

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências do Esporte**

Carolina Batista Simões

**RESPOSTAS AGUDAS DA TEMPERATURA DA PELE À INGESTÃO DE  
REFEIÇÕES RICAS EM DIFERENTES MACRONUTRIENTES EM PARATLETAS:  
um estudo cruzado e randomizado utilizando termografia infravermelha**

Belo Horizonte  
2024

Carolina Batista Simões

**RESPOSTAS AGUDAS DA TEMPERATURA DA PELE À INGESTÃO DE  
REFEIÇÕES RICAS EM DIFERENTES MACRONUTRIENTES EM PARATLETAS:  
um estudo cruzado e randomizado utilizando termografia infravermelha**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências do Esporte da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Ciências do Esporte.

Linha de pesquisa: Aspectos psicobiológicos do desempenho humano

Orientador: Prof. Dr. Dawit Albieiro Pinheiro Gonçalves

Belo Horizonte  
2024

S593r Simões, Carolina Batista  
2024 Respostas agudas da temperatura da pele à ingestão de refeições ricas em diferentes macronutrientes em paratletas: um estudo cruzado e randomizado utilizando termografia infravermelha. [manuscrito] / Carolina Batista Simões – 2024.  
119 f.: il.

Orientador: Dawit Albieiro Pinheiro Gonçalves

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional.

Bibliografia: f. 70-79

1. Metabolismo - Teses. 2. Dieta – Fisiologia - Teses. 3. Termografia – Teses. 4. Deficientes – Teses. I. Gonçalves, Dawit Albieiro Pinheiro. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional. III. Título.

CDU: 612.015.3

**Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Antônio Afonso P. Júnior, CRB 6: nº2637 da Biblioteca da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional da UFMG.**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA, FISIOTERAPIA E TERAPIA OCUPACIONAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO ESPORTE

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

**CAROLINA BATISTA SIMÕES**

Às **10:00 horas** do dia **14 de novembro de 2024**, a comissão examinadora, indicada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Esporte, reuniu-se no Auditório do Centro de Treinamento Esportivo da Universidade Federal de Minas Gerais, para julgar, em exame final, a dissertação intitulada "**Respostas agudas da temperatura da pele à ingestão de refeições com diferentes composições de macronutrientes em paratletas: um estudo cruzado e randomizado utilizando termografia infravermelha**". Abrindo a sessão, o presidente da comissão, Prof. Dr. Dawit Albieiro Pinheiro Gonçalves (UFMG), orientador, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares de Defesa do Trabalho Final, passou a palavra para a candidata, que realizou a apresentação da sua dissertação. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, a comissão se reuniu, sem a presença da candidata e do público, para julgamento e expedição do resultado.

Prof. Dr. Dawit Albieiro Pinheiro Gonçalves (Universidade Federal de Minas Gerais - orientador)

Prof. Dr. Eduardo Mendonça Pimenta (Universidade Federal de Minas Gerais - coorientador)

Prof. Dr. Marco Tulio de Mello (Universidade Federal de Minas Gerais)

Prof. Dr. José Ignacio Priego Quesada (Universitat de València)

Após as indicações, a candidata foi considerada: **APROVADA**.

Nada mais havendo a tratar, eu, Prof. Dr. Dawit Albieiro Pinheiro Gonçalves, presidente da comissão examinadora, dei por encerrada a reunião, da qual, para constar, lavrei a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.

Belo Horizonte, 14 de novembro de 2024.

---

Documento assinado eletronicamente por **Dawit Albieiro Pinheiro Gonçalves, Professor do**



**Magistério Superior**, em 29/11/2024, às 23:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Mendonca Pimenta, Professor(a)**, em 02/12/2024, às 12:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Ignacio Priego Quesada, Usuário Externo**, em 02/12/2024, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Tulio de Mello, Professor(a)**, em 04/12/2024, às 07:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3662703** e o código CRC **761BF72C**.

Dedico este trabalho aos meus pais, Fernanda e Davidson, à minha família, aos meus amigos e ao meu namorado Álvaro.

Obrigada por tanto!

## AGRADECIMENTOS

Ao longo desses anos, vivi momentos intensos e transformadores, enfrentei desafios que nunca imaginei, mas que trouxeram grandes lições e me permitiram conhecer pessoas que marcaram profundamente minha trajetória. Cada etapa deste percurso foi enriquecida pela presença e apoio de pessoas queridas, a quem agora expresso minha mais sincera gratidão.

Agradeço aos meus pais, Fernanda e Davidson, e ao meu irmão, Felipe, pelo amor incondicional que foi o alicerce sobre o qual pude construir cada pequeno avanço e me sentir segura em cada recomeço.

Agradeço ao meu namorado, Álvaro, por ter sido meu refúgio e equilíbrio.

Agradeço os meus colegas e amigos de laboratório, por toda a parceria e pelo companheirismo dos últimos anos.

Agradeço o meu orientador, Dawit, por ser o meu maior exemplo profissional. Sou profundamente grata por todo o conhecimento compartilhado, pela paciência em cada correção e pela confiança que depositou em mim.

Minha gratidão também aos professores que encontrei ao longo de minha vida acadêmica, e a todos os funcionários e colaboradores da Universidade que, com suas contribuições, tornaram essa experiência possível. A cada um de vocês, meu reconhecimento e admiração.

A todos que, direta ou indiretamente, deixaram suas marcas nesta trajetória, meu muito obrigada. Este trabalho é, em grande parte, fruto do carinho e do apoio de cada um de vocês.

A todos vocês,  
Muito obrigada.

## RESUMO

Este estudo utilizou termografia infravermelha (TI) para investigar as respostas termogênicas de paratletas à ingestão de diferentes macronutrientes. Nosso objetivo foi avaliar os efeitos agudos de refeições ricas em carboidratos (CHO), proteínas (PTN) e gorduras (GOR) na temperatura da pele ( $T_{pele}$ ) em regiões do corpo correspondentes a músculos esqueléticos relacionados ao esporte, em paratletas de atletismo e halterofilismo paralímpico. Também consideramos a influência de diversos fatores biológicos e ambientais. Dez paratletas participaram deste estudo randomizado e cruzado, em que a  $T_{pele}$  foi medida em dez diferentes regiões do corpo em vários momentos agudos após a ingestão de refeições isocalóricas ricas em carboidratos, proteínas ou gorduras, e durante uma condição de jejum noturno (JN). Nossos resultados revelam que, entre os fatores biológicos, CHO e PTN, o sexo biológico, assim como a temperatura inicial e certas regiões do corpo (como o braço anterior e o peitoral), levaram a aumentos notáveis na  $T_{pele}$ . Por outro lado, a idade e a avaliação de regiões posteriores (como o braço e o deltoide) resultaram em reduções na  $T_{pele}$ . Em relação aos fatores ambientais, medicamentos musculares e contraceptivos orais, medições realizadas no período da tarde, a temperatura ambiente e a umidade relativa promoveram aumentos na  $T_{pele}$ , enquanto o passar do tempo durante a medição causou uma leve diminuição. Notavelmente, este estudo demonstra, pela primeira vez, os efeitos diretos da termogênese induzida pela dieta na  $T_{pele}$  em regiões associadas ao músculo esquelético, ampliando o escopo da TI na avaliação de respostas metabólicas. Além disso, interações significativas entre GOR e região corporal, assim como entre PTN, GOR e deficiências, sugerem que a gordura e a proteína da dieta podem potencializar efeitos termogênicos localizados e influenciar a  $T_{pele}$  de acordo com as características fisiológicas específicas dos atletas, incluindo suas deficiências. Os resultados destacam a complexidade das respostas termorregulatórias e ressaltam a necessidade de maior rigor nos estudos futuros ao considerar fatores dietéticos nas medições por TI. Essa consideração também é essencial na prática clínica, visto que os fatores dietéticos são cruciais para obter imagens térmicas precisas e otimizar o cuidado individualizado.

Palavras-chave: termografia infravermelha; termogênese induzida pela dieta; metabolismo.

## ABSTRACT

This study used infrared thermography (IT) to investigate the thermogenic responses of para-athletes to different macronutrient intakes. We aimed to evaluate the acute effects of carbohydrate (CHO), protein (PTN), and fat-rich meals (FAT) on skin temperature (Tsk) in body regions corresponding to sport-related skeletal muscles from para-athletics and para-powerlifting athletes. We also considered the influence of various biological and environmental factors. Ten para-athletes participated in this randomized crossover study, where Tsk was measured in ten different body regions at several acute time points following the intake of isocaloric meals rich in carbohydrates, proteins, or fats and during a fasting condition (OvF). Our findings reveal that among biological factors, CHO and PTN, biological sex, as well as the initial temperature and certain body regions (such as the anterior arm and pectoral), resulted in notable increases in Tsk. On the other hand, age and the evaluation of posterior regions (such as the arm and deltoid) led to decreases in Tsk. Regarding environmental factors, muscle-related medications and oral contraceptives, measurements taken in the afternoon, ambient temperature, and relative humidity promoted increases in Tsk, while time during the measurement caused a slight decrease. Notably, this study demonstrates, for the first time, the direct effects of diet-induced thermogenesis on Tsk in regions associated with skeletal muscle, expanding the scope of IT in assessing metabolic responses. Additionally, significant interactions between FAT and body region, as well as PTN, FAT and disabilities suggest that dietary fat and protein may enhance localized thermogenic effects and influence Tsk according to the athletes' specific physiological characteristics, including their disabilities. The results underscore the complexity of thermoregulatory responses and highlight the need for greater rigor in future studies when accounting for dietary factors in IT measurements. This consideration is also essential in clinical practice, as dietary factors are crucial for obtaining accurate thermal images and optimizing individualized care.

Keywords: infrared thermography; diet-induced thermogenesis; metabolism.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo esquemático do delineamento experimental

Figura 2 – ROIs delimitados para análise de termografia infravermelha

Figura 3.1 – Impacto dos Outliers na Normalidade dos Resíduos: Comparação dos Gráficos Q-Q Normais – sem outliers

Figura 3.2 – Impacto dos Outliers na Normalidade dos Resíduos: Comparação dos Gráficos Q-Q Normais – com outliers

Figura 4 – Glicemia em 0, 60 e 120 minutos para jejum, refeições ricas em carboidratos, proteínas e gorduras.

Figura 5.1– CK e Dor muscular avaliada pela escala EVA dos atletas nas quatro condições experimentais.

Figura 5.2– PSR e parâmetros de bem-estar dos atletas nas quatro condições experimentais.

Figura 6.1 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de deltoide anterior dominante entre as quatro condições dietéticas.

Figura 6.2 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de deltoide anterior não-dominante entre as quatro condições dietéticas.

Figura 6.3 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de peitoral dominante entre as quatro condições dietéticas.

Figura 6.4 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de peitoral não-dominante entre as quatro condições dietéticas. JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Figura 6.5 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de braço anterior dominante entre as quatro condições dietéticas.

Figura 6.6 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de braço anterior não-dominante entre as quatro condições dietéticas.

Figura 6.7 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de deltoide posterior dominante entre as quatro condições dietéticas.

Figura 6.8 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de deltoide posterior não-dominante entre as quatro condições dietéticas.

Figura 6.9 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de braço posterior dominante entre as quatro condições dietéticas.

Figura 6.10 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de braço posterior não-dominante entre as quatro condições dietéticas.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Conteúdo calórico e quantidades de macronutrientes por atleta de acordo com o macronutriente-alvo em cada condição

Tabela 2 – Avaliação do consumo alimentar médio dos voluntários por meio de recordatórios 24-horas

Tabela 3 – Características dos atletas

Tabela 4 – Fatores biológicos como variáveis independentes do modelo linear misto

Tabela 5 – Fatores ambientais como variáveis independentes e interações do modelo linear misto

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC – Critério de Informação de Akaike  
ANOVA – Análise de variância  
ATP – adenosina trifosfato  
CHO – Refeição rica em carboidratos  
CK – Creatina quinase  
CPB – Comitê Paralímpico Brasileiro  
CTE – Centro de Treinamento Esportivo  
EVA – Escala Visual Analógica  
FC – Frequência Cardíaca  
GOR – Refeição rica em gorduras  
IGF-1 – Fator de crescimento semelhante à insulina tipo 1  
Dor – Domínio de dor muscular na Escala de Hooper  
Estresse – Domínio de estresse na Escala de Hooper  
Fadiga – Domínio de fadiga na Escala de Hooper  
FGFR3 – Receptor 3 do fator de crescimento de fibroblastos  
IH – Índice de Hooper  
Sono – Domínio de sono na Escala de Hooper  
IMC – Índice de massa corporal  
JN – Jejum noturno  
PSE – Percepção Subjetiva de Esforço  
PSR – Percepção Subjetiva de Recuperação  
PTN – Refeição rica em proteínas  
ROI – Região de Interesse  
SNC – Sistema Nervoso Central  
TAM – Tecido Adiposo Marrom  
 $T_{amb}$  – Temperatura ambiente da sala  
TI – Termografia infravermelha  
TID – Termogênese Induzida pela Dieta  
 $T_{pele}$  – Temperatura da pele  
 $T_{pre}$  – Temperatura pré-aclimação  
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais  
UR – Umidade relativa do ar  
VEGF – Fator de crescimento endotelial vascular

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Evolução da termografia infravermelha	15
1.2	Princípios físicos gerais da termografia infravermelha	17
1.3	Termorregulação	18
1.4	Termografia infravermelha no contexto esportivo	20
1.5	Termorregulação no paratleta	22
1.6	Fatores que podem interferir na termografia infravermelha	24
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>HIPÓTESE</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>30</b>
4.1	Amostra	30
4.2	Desenho experimental	30
4.2.1	Intervenção nutricional	32
4.2.2	Termografia infravermelha	34
4.2.3	Percepção subjetiva de recuperação (PSR), parâmetros de bem-estar, e Escala Visual Analógica (EVA) para dor muscular	36
4.2.4	Análise de glicemia capilar e CK	36
4.2.5	Deficiências	36
4.2.6	Medicações	37
4.3	Análise estatística	37
4.3.1	Modelo linear misto	40
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>45</b>
5.1	Características da amostra	45
5.2	A refeição rica em carboidrato aumenta os níveis de glicemia	46
5.3	Os marcadores de dano muscular, dor, bem-estar e recuperação são semelhantes entre as diferentes condições dietéticas	46
5.5	CHO, PTN e outros fatores ambientais e biológicos influenciam a Tpele	49
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos quatro Jogos Paralímpicos, o Brasil destacou-se entre os 10 primeiros países no quadro geral de medalhas, o que evidencia não apenas o crescimento do paradesporto nacional, mas também a necessidade de avanços científicos e tecnológicos para atender às demandas desses atletas (Esteves *et al.*, 2015). Esse crescimento, impulsionado por políticas públicas de incentivo ao esporte, exige da ciência e das equipes multidisciplinares uma adaptação constante para otimizar o desempenho esportivo dos paratletas. Nesse contexto, a criação de Centros de Referência Paralímpicos pelo Comitê Paralímpico Brasileiro (CPB) em parceria com Universidades, como o Centro de Treinamento Esportivo (CTE) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), contribui não só para a preparação de ponta dos atletas, mas também para a formação técnica-científica dos estudantes e o fomento de pesquisas com esse público (Silva; Mello, 2021).

No entanto, entender como o treinamento esportivo impacta a fisiologia e a saúde dos paratletas é um grande desafio (Stieler *et al.*, 2023). As diferentes deficiências afetam as respostas fisiológicas em repouso e no esforço, e o treinamento físico nesses atletas apresenta particularidades que aumentam a complexidade do processo de monitoramento e ajuste das cargas de treinamento. Além disso, as altas incidências de lesões esportivas relatadas por paratletas de elite, em comparação a atletas sem deficiência (Fagher *et al.*, 2020), ressaltam a necessidade de estratégias específicas de prevenção e manejo dessas lesões. Considerando que, além de afastar o atleta do treinamento, essas lesões podem impactar diretamente suas atividades diárias (Sacks *et al.*, 2022), torna-se essencial desenvolver abordagens personalizadas para esse público.

Diante dessas demandas únicas, as ferramentas de monitoramento e controle de carga de treinamento tornam-se essenciais para ajustar de forma individualizada os programas de treinamento esportivo (Borresen; Ian Lambert, 2009). O monitoramento adequado da carga externa de treinamento — que se refere ao trabalho físico prescrito pelo treinador — e da carga interna de treinamento — que corresponde as respostas psicobiológicas dos atletas — permite intervenções mais precisas (Bourdon *et al.*, 2017). No entanto, muitas das ferramentas atualmente utilizadas, como a percepção subjetiva de esforço (PSE), a frequência cardíaca (FC) e o lactato sanguíneo, são insuficientes para detectar alterações específicas e locais, como a

inflamação em músculos exercitados. Além disso, muitos desses instrumentos ainda não foram validados para uso em paratletas (Stieler *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a termografia infravermelha (TI) surge como uma ferramenta promissora para preencher essas lacunas. A TI é uma técnica segura, não invasiva e de baixo custo, que permite monitorar de maneira eficaz as respostas fisiológicas ao treinamento, sendo a temperatura da pele ( $T_{pele}$ ) o principal parâmetro avaliado (Kesztyüs *et al.*, 2023). Isso é particularmente importante em paratletas, cujas deficiências podem impactar diretamente os mecanismos termorregulatórios do corpo e influenciar a  $T_{pele}$  (Griggs *et al.*, 2015; Stephenson *et al.*, 2020). As variações de  $T_{pele}$  registradas nos segmentos corporais exercitados são altamente relevantes para a avaliação esportiva, pois podem indicar sobrecarga muscular e fadiga precoce, possibilitando intervenções preventivas antes que lesões se agravem (Côrte *et al.*, 2019). Esse contexto torna a TI uma ferramenta extremamente útil no paradesporto, dado que uma lesão não apenas afasta o paratleta da rotina de treinamento, mas também compromete significativamente suas atividades diárias, influenciando diretamente sua qualidade de vida e desempenho funcional (Pinheiro *et al.*, 2024). Contudo, por ser uma ferramenta relativamente recente na ciência do esporte, com diretrizes e protocolos estabelecidos há poucas décadas, é necessário entender quais variáveis podem modular a  $T_{pele}$  a fim de evitar erros de medição e garantir a padronização da técnica (Moreira *et al.*, 2017).

### 1.1 Evolução da termografia infravermelha

Desde a antiguidade, a relação entre o calor e a vida já era reconhecida por filósofos e médicos. Por volta de 400 a.C., o conceito de temperatura corporal começou a ser explorado através de métodos rudimentares, como a aplicação de uma fina camada de lama sobre o corpo. Foram observadas as taxas de secagem da lama em diferentes regiões (centrais e apendiculares), às quais foram atribuídas classificações de temperaturas mais quentes ou mais frias, conforme as variações identificadas (Gershon-Cohen, 1964). Hipócrates, considerado o pai da medicina, foi pioneiro ao afirmar que “em qualquer parte do corpo, se houver excesso de calor ou de frio, a doença está presente e deve ser identificada”. Essa observação marcou o início do uso da temperatura corporal como um indicador de estados patológicos, estabelecendo a conexão fundamental entre variações térmicas e condições de saúde (Clark, 1984).

No início do século XIX, o cientista britânico William Herschel fez uma descoberta revolucionária. Usando um espectroscópio, Herschel identificou que diferentes cores possuem

diferentes temperaturas, observando que a área logo após o vermelho no espectro possuía a maior temperatura, apesar de ser invisível ao olho humano. O termo "infravermelho" - posteriormente conceituado - vem exatamente de sua localização "abaixo do vermelho" no espectro eletromagnético, descrevendo uma forma específica de energia que seria fundamental para a termografia. Posteriormente, seu filho John Herschel, foi responsável por produzir em papel a primeira termografia, consolidando a aplicação da radiação infravermelha para estudos térmicos (Sarawade; Charniya, 2018).

No entanto, foi apenas durante e após a Segunda Guerra Mundial que a termografia começou a encontrar aplicações práticas e clínicas mais amplas. Durante esse período, o exército americano passou a utilizar sensores infravermelhos para fins militares, desenvolvendo câmeras que eram capazes de medir as variações de temperatura sem contato direto, em específico à noite ou em locais com baixa visibilidade. Esses dispositivos foram inicialmente usados para detectar fontes de calor em operações de vigilância e defesa (Sarawade; Charniya, 2018). Essa tecnologia evoluiu e, em 1957, o médico canadense Dr. Ray Lawson observou que a presença de câncer de mama poderia ser detectada por meio de um aumento na  $T_{pele}$ . Lawson utilizou termógrafos militares adaptados para esse fim, pioneiramente no uso da TI na medicina (Clark, 1984). Já nos anos 60 e 70, os avanços nas câmeras de imagem térmica permitiram a captura de imagens termográficas detalhadas, substituindo métodos convencionais como termômetros de contato e termometria de cristal líquido, que forneciam apenas medidas pontuais (Ring, 2006). No entanto, a falta de padrões metodológicos rigorosos e a qualidade inconsistente das imagens limitaram a aceitação da técnica no meio científico. Muitos estudos iniciais foram descartados devido à imprecisão dos dados. Durante décadas, a termografia foi vista como uma técnica promissora, mas com muitos desafios a serem superados antes de sua aceitação definitiva (Gershon-Cohen, 1964).

Foi apenas com o rápido avanço da tecnologia de câmeras infravermelhas, nas últimas décadas, que a TI finalmente se consolidou como uma ferramenta eficaz para o diagnóstico médico. As câmeras modernas oferecem uma resolução significativamente melhor, maior precisão na captação de pequenas variações de temperatura e uma padronização de metodologias que garante resultados mais confiáveis (Sarawade; Charniya, 2018). Esses avanços tecnológicos possibilitaram a aplicação da termografia no diagnóstico de várias patologias, desde lesões musculares até condições inflamatórias e vasculares, permitindo uma abordagem não invasiva e indolor para monitorar o estado fisiológico do corpo humano. Em

1987, o reconhecimento formal da termografia pela *American Medical Association* consolidou essa técnica como um “instrumento diagnóstico factível” (Ring; Ammer, 2015). Desde então, seu uso se expandiu para áreas como medicina esportiva, educação física, fisioterapia, oncologia e saúde ocupacional, proporcionando diagnósticos mais precisos e intervenções preventivas.

## 1.2 Princípios físicos gerais da termografia infravermelha

A TI é uma técnica de diagnóstico por imagem baseada na detecção da radiação térmica emitida por objetos e superfícies. A radiação térmica corresponde à energia emitida por qualquer corpo cuja temperatura esteja acima do zero absoluto (0K ou  $-273.15^{\circ}\text{C}$ ). Esse fenômeno ocorre naturalmente em todos os objetos devido ao movimento das partículas internas causado pela energia térmica presente no sistema. Quanto maior for a excitação molecular, maior é a intensidade da radiação emitida e, conseqüentemente, maior é a temperatura (Dahmen, 2006). Embora essa radiação seja invisível a olho nu, ela pode ser captada por sensores infravermelhos, que convertem a emissão em imagens térmicas. Essas imagens com escalas colorimétricas de temperatura pré-definidas proporcionam uma visão precisa da distribuição de temperatura nas superfícies, o que torna a termografia uma ferramenta útil em diversas aplicações (Sarawade; Charniya, 2018).

Um fator crucial para a precisão dessa técnica é a emissividade dos materiais, ou seja, a capacidade de um objeto de emitir radiação térmica em comparação com um emissor perfeito, chamado de corpo negro ideal. Um corpo negro ideal absorverá 100% da radiação incidente, o que significa que ele nem refletirá nem transmitirá qualquer radiação. Os valores de emissividade vão de 0 (zero), para um refletor perfeito, a 1 (um), para o emissor perfeito (corpo negro). Portanto, materiais com alta emissividade, como a pele humana, que tem um valor próximo a 0,98, emitem radiação de forma eficiente, o que possibilita medições térmicas mais precisas. Em contrapartida, materiais com baixa emissividade, como superfícies metálicas, tendem a refletir a radiação do ambiente em vez de emitir sua própria radiação (Novo *et al.*, 2014).

Além disso, é importante considerar os fatores externos que podem influenciar a medição, como a transmissão e absorção da radiação pelo ambiente. A radiação infravermelha não necessita de um meio para se propagar, então ela pode ser afetada por superfícies próximas ou pelo próprio ar, que podem refletir radiação de outras fontes (Jiang *et al.*, 2005). Isso pode

gerar leituras incorretas, por exemplo, objetos com alta refletividade podem "enganar" o sensor, refletindo radiação externa em vez de emitirem sua própria radiação térmica. Para obter resultados precisos, é fundamental minimizar essas interferências, isolando o objeto em análise das influências do ambiente, ou padronizando os fatores intervenientes da coleta, como a umidade relativa do ar (UR), a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), ou o próprio valor de emissividade definido (Moreira *et al.*, 2017).

### 1.3 Termorregulação

A regulação da temperatura corporal central é um fator chave para a homeostase e a sobrevivência. Como a estrutura das proteínas é fortemente influenciada pela temperatura, a atividade das enzimas, a contratilidade muscular, a interação hormônio-receptor e a atividade neuronal são diretamente dependentes de uma temperatura corporal adequada (Daniel *et al.*, 2010; Moyle *et al.*, 1978; Van Hook, 2020; Waelbroeck; Van Obberghen; De Meyts, 1979). O sistema nervoso central (SNC), por meio de mecanismos refinados, é o principal regulador da produção e da perda de calor, mantendo a temperatura interna relativamente constante. O controle da temperatura corporal depende da interação entre estruturas centrais e periféricas. A  $T_{pele}$  é detectada por termorreceptores periféricos, principalmente fibras aferentes do tipo C, que transmitem sinais térmicos ao SNC pela raiz dorsal da medula espinhal. Esses sinais decussam e seguem pelos tratos espinotalâmico e espino-hipotalâmico. Parte das aferências é projetada para o tálamo ventrobasal e o córtex somatossensorial, permitindo a discriminação da  $T_{pele}$ . Além dos termorreceptores periféricos, os termorreceptores centrais, localizados em diversas regiões do SNC, como a medula espinhal, a formação reticular e a área pré-óptica do hipotálamo anterior, monitoram as variações da temperatura central. Na área pré-óptica, os neurônios sensíveis à temperatura desempenham um papel fundamental: neurônios sensíveis ao calor aumentam sua frequência de disparo com a elevação da temperatura e inibem sinapticamente os neurônios sensíveis ao frio. Estes, por sua vez, aumentam sua atividade quando a  $T_{amb}$  diminui. Os neurônios sensíveis ao frio projetam-se para o hipotálamo posterior e outras áreas do tronco encefálico, ativando respostas autonômicas, como vasoconstrição, tremores musculares e ativação do tecido adiposo marrom (TAM) em resposta ao frio, ou sudorese e vasodilatação cutânea em resposta ao calor (Boulant, 2000).

O hipotálamo também regula a termogênese por meio de hormônios como a tiroxina e catecolaminas, que aumentam a produção de calor em climas frios (Iwen; Oelkrug; Brabant, 2018). A regulação comportamental, mediada pelo córtex cerebral, complementa essas

respostas ao permitir que o organismo adote ações voluntárias, como buscar abrigo ou ajustar o vestuário. Assim, a termorregulação é um processo dinâmico que envolve a colaboração entre sinais periféricos e centrais, controle autonômico e comportamental, e regulação hormonal para garantir a manutenção da temperatura corporal dentro de limites ideais (Boulant, 2000).

A termogênese, ou produção de calor, é um dos principais mecanismos para a manutenção da temperatura corporal e pode ser dividida em dois tipos: obrigatória (como a termogênese resultante do efeito térmico do alimento) e facultativa (como a termogênese induzida pelo exercício) (Himms-Hagen, 1989; Van Marken Lichtenbelt; Schrauwen, 2011). Mesmo em repouso, o corpo consome energia para manter suas funções vitais, como a respiração e a circulação, o que caracteriza o metabolismo basal (Periasamy; Herrera; Reis, 2017). Contudo, a ingestão de alimentos aumenta a taxa metabólica, promovendo uma termogênese induzida pela dieta (TID) obrigatória - referente a digestão, absorção e metabolização dos nutrientes - ou a TID facultativa - dependente do tipo de nutriente ingerido (i.e., alimentos termogênicos, contendo cafeína ou capsaicina) (Saito *et al.*, 2020). Todos os macronutrientes (i.e. carboidratos, lipídios e proteínas) são degradados nas células, liberando grandes quantidades de energia durante o metabolismo (Goodman, 2010). Cerca de 70% da energia liberada dessas moléculas orgânicas é convertida imediatamente em calor (Podolsky; Morales, 1956). A hidrólise de adenosina trifosfato (ATP), essencial para a realização de trabalho celular, também gera calor como subproduto (Camargo; Furlan, 2011). Assim, o calor é um resultado inevitável da transformação de energia no organismo. Em repouso, o músculo esquelético - importante órgão metabólico e principal tecido termogênico do corpo - produz até 25% do calor total do corpo em repouso, e durante a contração muscular essa produção aumenta significativamente devido ao aumento da taxa metabólica (Blondin; Haman, 2018; Camargo; Furlan, 2011; Periasamy; Herrera; Reis, 2017).

A troca de calor entre o corpo e o ambiente ocorre por diferentes mecanismos: radiação, condução, convecção e evaporação. A radiação é o processo pelo qual superfícies emitem calor na forma de ondas eletromagnéticas, e sua taxa de emissão é determinada pela temperatura da superfície radiante - o que é justamente mensurado pela TI. A condução refere-se à transferência direta de calor entre duas superfícies em contato, enquanto a convecção envolve a transferência de calor para um fluido, como o ar ou a água, que circula ao redor da superfície corporal. A evaporação, por sua vez, é o mecanismo mais eficiente de troca de calor em ambientes quentes, uma vez que a perda de calor ocorre quando o suor, secretado pelas glândulas sudoríparas,

evapora da pele. As chamadas trocas secas (radiação, condução e convecção) ocorrem quando a  $T_{pele}$  é maior do que a  $T_{amb}$ , resultando na perda de calor. Entretanto, quando a  $T_{amb}$  supera a da pele, o corpo pode começar a ganhar calor em vez de perdê-lo, aumentando a demanda por trocas úmidas, como a evaporação, para dissipar o excesso de calor (Kenny; Jay, 2013).

Ademais, o calor produzido pelos órgãos e tecidos profundos, especialmente pelo fígado, cérebro, coração e músculos esqueléticos, é transferido por condução ou convecção para a pele, onde é dissipado para o ambiente. Em menor grau, o calor também é perdido por evaporação nas vias respiratórias. A perfusão sanguínea periférica desempenha um papel crucial na troca de calor com o ambiente: a vasodilatação aumenta a perda de calor ao permitir maior fluxo sanguíneo para a pele, enquanto a vasoconstrição reduz essa perda ao restringir o fluxo sanguíneo periférico. Alterações na  $T_{amb}$  causam mudanças no tônus vascular das arteríolas e anastomoses arteriovenosas, ajustando a troca de calor de acordo com as necessidades do corpo. À medida que a  $T_{amb}$  aumenta, a perda evaporativa de calor se torna o mecanismo mais importante. A sudorese, regulada pelo sistema nervoso simpático por vias colinérgicas, facilita a perda de calor por evaporação. Nesse processo, o suor na superfície da pele se evapora, liberando o calor retido no líquido para o ambiente. Essa liberação ajuda a retardar o aumento da temperatura interna (Nazari *et al.*, 2020; Périard; Eijsvogels; Daanen, 2021).

Neste sentido, a TI torna-se uma ferramenta útil no mapeamento detalhado da distribuição da temperatura corporal, pois captura a radiação térmica emitida localmente pela pele. A TI utiliza o conceito de região de interesse (ROI, do inglês *region of interest*), que corresponde a áreas específicas, como a superfície corporal no contexto biomédico, selecionadas para análise, de acordo com os objetivos do estudo. Isso permite identificar e monitorar com precisão as variações térmicas em regiões específicas da pele, facilitando a compreensão segmentada das respostas termorregulatórias do corpo (Ramirez-Garcialuna *et al.*, 2022). Essa técnica não invasiva é especialmente valiosa para analisar como o calor é distribuído e dissipado em áreas específicas do corpo, oferecendo dados detalhados sobre a temperatura cutânea e sua relação com a homeostase térmica (Kesztyüs *et al.*, 2023).

#### 1.4 Termografia infravermelha no contexto esportivo

A TI tem sido amplamente utilizada no contexto esportivo como uma ferramenta eficaz para monitorar a carga de treinamento e avaliar o risco de lesão. Após exercícios intensos,

especialmente os que envolvem movimentos excêntricos, há um aumento nas concentrações de proteínas como a creatina quinase (CK) e mioglobina, que indicam dano muscular (Da Silva *et al.*, 2018; Fraga *et al.*, 2020). Esse processo de lesão e reparo segue três fases principais: destruição, reparação e remodelação. Primeiramente, microlesões nas fibras musculares desencadeiam uma resposta inflamatória, caracterizada por calor, rubor, edema, dor, e perda de função, devido ao aumento do fluxo sanguíneo e à infiltração de células imunes no tecido afetado. Na fase de reparação, neutrófilos e macrófagos atuam na fagocitose do tecido danificado, enquanto macrófagos M1 liberam citocinas pró-inflamatórias, como IL-1 e TNF- $\alpha$ , intensificando a resposta inflamatória. Concomitantemente, macrófagos M2 iniciam a liberação de citocinas anti-inflamatórias e fatores de crescimento, que auxiliam no processo de reparo e mitigam a inflamação excessiva. O aumento do fluxo sanguíneo, consequência da vasodilatação promovida por prostaglandinas e óxido nítrico, facilita a chegada de nutrientes e células imunes essenciais para o reparo muscular. Na fase final, de remodelação, ocorre a reorganização das fibras musculares e a revascularização do tecido, um processo sustentado por fatores de crescimento, como o fator de crescimento endotelial vascular (VEGF) e o fator de crescimento semelhante à insulina tipo 1 (IGF-1), fundamentais para restaurar a estrutura e a funcionalidade muscular (Peake *et al.*, 2017).

Dessa forma, a TI se destaca como uma ferramenta eficaz para detectar precocemente alterações na  $T_{pele}$  que refletem processos de estresse local, atuando na identificação inicial de lesões, já na fase inicial da inflamação. Estudos têm reforçado o papel da TI na redução da incidência de lesões e na compreensão do comportamento da  $T_{pele}$  frente a cargas intensas de treinamento. Gomez Carmona (2012) observaram que a implementação de um programa de prevenção utilizando TI durante a pré-temporada reduziu a incidência de lesões em comparação com um programa de prevenção tradicional, além de diminuir o tempo de afastamento dos atletas. Da mesma forma, o estudo de Côte *et al.* (2019) demonstrou uma redução significativa na taxa de lesões em jogadores de futebol, de 78% para 28%, ao comparar duas temporadas com e sem o uso da TI para monitoramento. Esses achados ressaltam o potencial da TI como um recurso preventivo e eficiente para avaliação precoce de lesões.

Por outro lado, estudos indicam que a avaliação da  $T_{pele}$  após o esforço está diretamente relacionada à carga interna de treinamento e ao momento da medição, uma vez que a dinâmica de elevação da  $T_{pele}$  pode não apresentar um comportamento linear diante de danos musculares, podendo inclusive sofrer redução após um determinado limiar de sobrecarga (Da Silva *et al.*, 2024). Dada a complexidade e a diversidade dos fatores que impactam o desempenho e o bem-estar dos atletas, é fundamental integrar ferramentas objetivas e subjetivas no processo de

avaliação. Ferramentas objetivas, como a TI, baseiam-se em medições quantificáveis e observáveis, enquanto ferramentas subjetivas, como escalas psicométricas de bem-estar, capturam percepções pessoais e respostas emocionais e psicológicas do atleta. Essa abordagem combinada é essencial para identificar aspectos emocionais e estados psicológicos que frequentemente precedem alterações fisiológicas detectáveis, permitindo intervenções mais precoces e personalizadas (Meeusen *et al.*, 2013). Ao integrar essas abordagens, é possível não só monitorar com maior precisão o estresse e a recuperação, mas também responder a sintomas precoces de fadiga e sobrecarga, promovendo intervenções mais personalizadas e efetivas na prevenção de lesões e no desempenho esportivo. Isso é particularmente relevante no contexto dos paratletas, onde a individualidade biológica e as necessidades específicas de cada atleta demandam uma análise ampla e cuidadosa para evitar problemas como o *overtraining* e as lesões recorrentes.

### 1.5 Termorregulação no paratleta

De acordo com a classificação internacional, um espectro de deficiências físicas, visuais e intelectuais se tornam elegíveis para determinadas competições ou modalidades (Tweedy; Vanlandewijck, 2011). Neste sentido, o estudo do paradesporto exige a compreensão das diferentes formas de deficiência e seus impactos específicos. Em particular, a termorregulação de paratletas é um grande desafio, em virtude das múltiplas formas de deficiência e da maneira distinta que elas afetam os mecanismos de controle da temperatura corporal. Por exemplo, na paralisia cerebral, o impacto termorregulatório depende da localização e da extensão das lesões cerebrais. Se o hipotálamo - região responsável por regular o sistema autonômico, e, portanto, funções como controle da pressão arterial, FC, digestão e temperatura - for lesado, é possível desenvolver uma disfunção autonômica e conseqüentemente uma regulação da temperatura corporal deficitária (Verduzco-Mendoza *et al.*, 2023). Para além disso, a limitação de movimento em pessoas com paralisia cerebral reduz a demanda metabólica dos músculos esqueléticos e diminui o fluxo sanguíneo periférico, especialmente nas extremidades, o que compromete a troca de calor envolvendo o sistema circulatório (convecção) no corpo (Shin; Jung, 2021). Essa combinação implica em menor produção de calor local e menor redistribuição do calor dos tecidos termogênicos para a pele e as regiões distais do corpo, como mãos e pés, podendo resultar em temperaturas mais baixas nessas regiões (Gowda; Jaffa; Badjatia, 2018).

Outro exemplo são os paratletas com lesão medular, cuja capacidade termorregulatória é significativamente comprometida devido à interrupção do controle supraespinal sobre o

sistema nervoso simpático. Esse controle depende de neurônios simpáticos localizados na coluna intermédia lateral da medula espinal, cuja sinalização é essencial para respostas como vasoconstrição e sudorese, fundamentais para a manutenção da temperatura corporal. Dependendo do nível da lesão, o corpo pode perder a capacidade de suar ou realizar vasoconstrição abaixo do nível da lesão, o que resulta em dificuldades para dissipar o calor corporal em ambientes quentes. Lesões acima de T6 são especialmente críticas, pois colocam o indivíduo em maior risco de disfunção autonômica grave, incluindo a hiperreflexia autonômica. Esta condição pode desencadear respostas exageradas a estímulos térmicos ou viscerais, provocando elevações perigosas da pressão arterial (Price; Trbovich, 2018).

Já paratletas com deficiência visual enfrentam desafios diferentes, mas igualmente importantes, na regulação da temperatura. Indivíduos com deficiência visual, especialmente aqueles sem percepção total de luz, frequentemente apresentam desajustes nos ritmos circadianos devido à ausência de estímulos luminosos para sincronizar o relógio biológico. Esse desajuste afeta funções fisiológicas como a produção de melatonina, hormônio que regula e reduz a temperatura corporal durante o sono, impactando diretamente a termorregulação (Atan *et al.*, 2023). Sem essa sincronização circadiana adequada, podem surgir ciclos irregulares de sono e vigília, o que afeta negativamente o controle da temperatura interna e a capacidade de adaptação às variações térmicas (Turek; Gillette, 2004).

A acondroplasia, a causa mais comum de baixa estatura desproporcional, resulta de uma mutação de ganho de função no gene FGFR3 (receptor 3 do fator de crescimento de fibroblastos). Essa condição caracteriza-se por membros encurtados em relação ao tronco, que apresenta tamanho próximo ao da média, além de outras características marcantes como macrocefalia, lordose lombar acentuada, *genu varum*, e hipotonia. Indivíduos com acondroplasia têm uma predisposição elevada à obesidade, particularmente abdominal, desde a infância. Estudos indicam, no entanto, que essas pessoas apresentam uma taxa metabólica basal mais alta, quando ajustada pela massa magra e avaliada por calorimetria indireta, em comparação com indivíduos sem a condição (Owen *et al.*, 1990). As particularidades anatômicas, a circulação periférica reduzida, alterações nas vias aéreas e a maior concentração de massa adiposa central podem comprometer a eficiência termorregulatória, dificultando a dissipação de calor em ambientes quentes e a conservação de calor em temperaturas frias. Esses fatores aumentam os desafios no controle da temperatura corporal, tornando-os mais suscetíveis a condições térmicas extremas.

## 1.6 Fatores que podem interferir na termografia infravermelha

Como dito anteriormente, a precisão da TI depende fortemente de protocolos rigorosos que controlam uma série de fatores internos e externos que podem interferir nos resultados (Mazdeyasna; Ghassemi; Wang, 2023). Entre os fatores internos, destacam-se características biológicas do indivíduo, como o sexo biológico, a idade ou mesmo o tipo de deficiência. Já entre os fatores externos, estão as condições ambientais durante a medição, como a UR e a  $T_{amb}$ . Para garantir que a TI produz informações precisas, isto é, termogramas livres de artefatos, e que os resultados sejam comparáveis entre diferentes estudos, é fundamental que esses protocolos sejam seguidos rigorosamente (Moreira *et al.*, 2017). Outro fator externo extremamente importante é a dieta. Para a nossa surpresa, embora o efeito de refeições com diferentes composições de macronutrientes seja bem conhecida no metabolismo (Carreiro *et al.*, 2016; Nehme *et al.*, 2023) e na produção de calor corporal (Dauncey; Bingham, 1983) nada é conhecido de forma sistemática sobre a resposta de TI (Gomez Carmona, 2012; Moreira *et al.*, 2017).

A TID pode aumentar o gasto energético após as refeições para metabolizar nutrientes (Saito *et al.*, 2020) o que é tradicionalmente medido por calorimetria indireta, uma técnica que estima o gasto energético através da medição do consumo de oxigênio e da produção de dióxido de carbono (Ho, 2018). No contexto da TI, a TID pode representar uma fonte significativa de interferência nos resultados, se não for devidamente controlada (Kenny; Jay, 2013; Saito *et al.*, 2020). Isso ocorre porque parte da energia química dos alimentos é inevitavelmente dissipada como calor, que poderá ser perdido para o ambiente. Portanto, a falta de controle sobre o tipo de alimento consumido e o tempo decorrido desde a última refeição pode introduzir variações não relacionadas ao objetivo da análise, afetando a reprodutibilidade dos resultados (Mazdeyasna; Ghassemi; Wang, 2023; Moreira *et al.*, 2017).

Os possíveis efeitos de aumento na  $T_{pele}$  em resposta a uma refeição não são novos. Dauncey e Bingham (1983) utilizaram a termografia infravermelha para avaliar o impacto da ingestão alimentar na  $T_{pele}$  em áreas com suspeita de presença de TAM. Embora as regiões suspeitas de conter TAM apresentassem temperaturas iniciais mais altas, os resultados mostraram que, após o consumo de uma refeição líquida composta por carboidratos, proteínas e gorduras, houve um primeiro aumento rápido na  $T_{pele}$  (~30 minutos após a refeição), seguido de um segundo aumento mais prolongado, com pico em aproximadamente 1,5 hora em todas as regiões medidas, não apenas nas associadas ao TAM. Esse padrão sugere que o aumento na

$T_{pele}$  pode estar relacionado a uma resposta vasodilatadora pós-prandial, em vez de uma ativação direta do TAM.

De forma curiosa, Shuran e Nelson (1991) compararam a calorimetria indireta e TI a fim de avaliar respostas térmicas pós-prandiais e durante o jejum. Os autores estimaram o calor liberado com equações preditivas para ambas as ferramentas, e verificaram que em jejum, os valores de calor captados pela TI eram maiores do que os valores estimados pela calorimetria. Isso se dá pelo fato de a calorimetria estimar o gasto energético baseado na premissa que todo substrato é oxidado e forma-se calor, gás carbônico e água. Contudo, diferentes vias energéticas, como a glicólise anaeróbica, não dependem de oxigênio como acceptor final, e são capazes de gerar calor como subproduto. Então, é possível que a TI seja mais eficiente para compreender o calor produzido por diferentes vias metabólicas, e ser mais preciso do que a calorimetria, especialmente em jejum (Shuran; Nelson, 1991).

Por outro lado, anos depois, o estudo de Habek *et al.* (2018) reforça essa análise, mas com foco na ativação do TAM em resposta a uma refeição sólida completa, que também incluía carboidratos, proteínas e gorduras. Avaliando a região supraclavicular (onde o TAM é comumente encontrado), os autores observaram que, 30 minutos após a refeição, houve um aumento no consumo de glicose e uma queda nas concentrações plasmáticas, sugerindo uma ativação metabólica associada ao TAM. Contudo, indivíduos com maior IMC e mulheres acima de 35 anos apresentaram uma menor ativação do TAM, refletindo menor capacidade termogênica e a um maior risco de desenvolver distúrbios metabólicos, como a intolerância à glicose, com a progressão da idade. Esse estudo, portanto, reforça que a ingestão de uma refeição completa pode aumentar a  $T_{pele}$ , mas também sugere que fatores como idade e composição corporal podem moderar essa resposta termogênica, impactando o metabolismo e a TID (Habek *et al.*, 2018).

Já no estudo de Jalil *et al.* (2019), foi utilizado o teste de tolerância oral à glicose para avaliar como a composição corporal impacta o metabolismo pós-prandial em mulheres com diferentes IMCs, utilizando a TI. Mesmo não sendo o objetivo primário do estudo, verificou-se que a distribuição do calor corporal após a ingestão de glicose varia significativamente entre mulheres magras e com sobrepeso, particularmente nas regiões do abdômen e das mãos. A resposta térmica das mulheres com sobrepeso mais “estável” e menos responsiva após a ingestão de glicose, em comparação com o aumento fisiológico da  $T_{pele}$  abdominal observado em mulheres magras, o que aponta para uma possível alteração no balanço energético de

indivíduos com sobrepeso (Jalil *et al.*, 2019), ou uma possível disfunção na eficiência termorregulatória associada à adiposidade. Além disso, este foi o primeiro estudo a demonstrar uma alteração na  $T_{pele}$  em resposta à TID, em regiões distais, como as mãos, e regiões centrais, como o abdômen, as quais apresentam padrões de resposta térmica distintos (Jalil *et al.*, 2019).

Apesar de uma resposta semelhante nos estudos, é importante ressaltar que diferentes macronutrientes produzem diferentes quantidades de calor durante a digestão e absorção. As proteínas são conhecidas por causar um efeito termogênico significativamente maior do que carboidratos ou lipídios, com a termogênese proteica sendo responsável por até 20-30% do valor calórico total ingerido (Ho, 2018; Saito *et al.*, 2020). Isso se deve ao fato de que as proteínas não podem ser armazenadas, o que demanda um processamento imediato (Bellissimo *et al.*, 2020) e uma maior utilização de ATP para a metabolização de aminoácidos do que outros nutrientes (Van Milgen, 2002). Os carboidratos, por sua vez, têm uma termogênese de aproximadamente 5-10%, enquanto os lipídios têm um impacto ainda menor, de cerca de 0-3% (Calcagno *et al.*, 2019). Porém, ressalta-se que, apesar de estes conceitos terem sido bem estabelecidos por meio da calorimetria indireta (Ho, 2018), a resposta térmica de refeições com diferentes composições de macronutrientes nunca foi avaliada por TI.

Nessa lógica, a composição das refeições prévias a TI poderia influenciar diretamente a  $T_{pele}$ . Por exemplo, refeições ricas em proteínas tenderiam a aumentar a temperatura corporal de maneira mais significativa e por um período mais prolongado do que refeições ricas em carboidratos ou gorduras. No contexto da TI, essas variações podem causar distorções significativas nas leituras térmicas, levando a interpretações errôneas sobre a termorregulação, se os efeitos da dieta não forem considerados nos protocolos. Embora o impacto da TID e o papel diferencial dos macronutrientes na produção de calor sejam conhecidos, muitos dos protocolos e diretrizes para a aplicação da TI não controlam adequadamente a dieta dos indivíduos antes da medição. A maioria dos estudos e recomendações sugere apenas que refeições "pesadas" sejam evitadas nas duas horas anteriores ao exame (Bandeira *et al.*, 2014; Moreira *et al.*, 2017), mas não fornecem detalhes sobre o tipo de macronutriente que devem ser consumidos ou se ainda o jejum seria uma opção mais eficaz. Diante dessa lacuna, alguns estudos optam por protocolos de jejum de até 12 horas (Nirengi *et al.*, 2019). No entanto, o efeito do jejum na resposta de TI também permanece desconhecido. Esse controle dietético insuficiente pode comprometer a validade dos dados coletados, introduzindo variabilidade nas leituras térmicas que não refletem alterações fisiológicas genuínas, mas sim o efeito térmico

dos alimentos consumidos anteriormente. Isso poderia afetar a precisão dos resultados e prejudicar a interpretação correta dos padrões térmicos observados.

Dada a natureza sensível da TI e sua dependência de variações mínimas de temperatura para detectar alterações fisiológicas ou patológicas, é essencial que futuros protocolos considerem o efeito da ingestão de diferentes alimentos nos resultados. Para isso, estudos devem investigar o efeito dos macronutrientes sobre as respostas de TI a fim de fornecer uma base científica mais robusta. Esses estudos contribuirão para o desenvolvimento de protocolos contendo o controle dietético como parte integrante das recomendações e, desse modo, melhorando a reprodutibilidade das respostas de TI.

## 2 OBJETIVOS

O **objetivo geral** do presente trabalho foi avaliar os efeitos agudos de refeições ricas em diferentes macronutrientes nas respostas termográficas dos segmentos corporais de paratletas de halterofilismo e atletismo.

Como **objetivos específicos**, ressalta-se:

- investigar os efeitos das refeições ricas em diferentes macronutrientes na resposta de TI na região da musculatura envolvida nas modalidades na condição de jejum e nos períodos pré e pós prandial.
- avaliar a resposta glicêmica na condição de jejum e nos períodos pré e pós prandial.
- analisar os parâmetros subjetivos de bem-estar (dor muscular, fadiga, estresse e qualidade do sono) e de recuperação pré-intervenções.

### **3 HIPÓTESE**

Refeições ricas em carboidrato e proteína, quando comparada às demais intervenções dietéticas, causarão um aumento da  $T_{pele}$  em segmentos corporais de paratletas de halterofilismo e atletismo.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

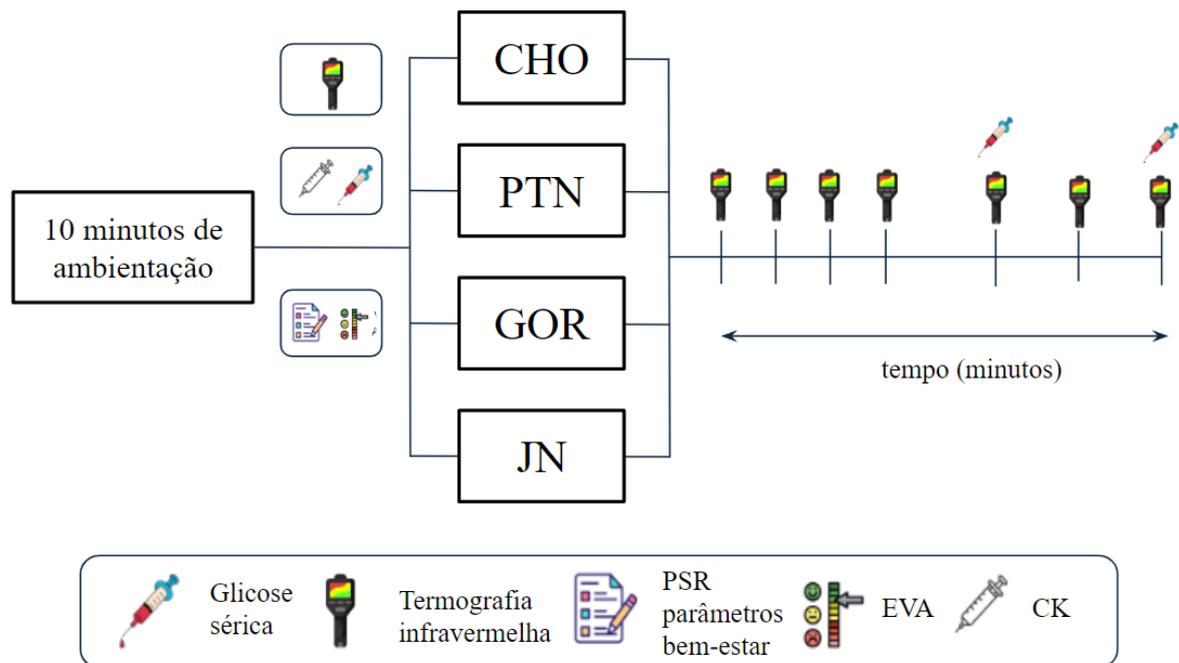
### 4.1 Amostra

Dez paratletas do CTE da UFMG foram recrutados. Os critérios de inclusão foram: (1) participação ativa em competições nos últimos 12 meses; (2) ausência de episódios de febre, processos inflamatórios ou lesões musculares nos últimos dois meses; e (3) ausência de alergias ou intolerâncias alimentares. Um atleta com deficiência intelectual foi excluído das análises psicométricas. A aprovação ética foi obtida junto ao comitê de ética local da UFMG (número de aprovação 68427923.8.0000.5149). Os participantes foram informados sobre os procedimentos e objetivos do estudo e forneceram consentimento por escrito.

### 4.2 Desenho experimental

O estudo foi conduzido de setembro a dezembro de 2023, durante a primavera no Brasil. A coleta de dados ocorreu ao longo de 6 semanas para cada paratleta, dividida em 4 condições, com um período total de coleta de 4 meses. Durante as 2 semanas iniciais, foi realizada a caracterização da amostra, incluindo a avaliação da composição corporal e a familiarização com os protocolos de TI. O estudo utilizou um desenho randomizado cruzado (Figura 1). Os protocolos foram realizados na sala do Setor de Fisiologia Esportiva do CTE. Cada paratleta passou pelas quatro condições de intervenção nutricional: 1) refeição rica em carboidratos (CHO), 2) refeição rica em proteínas (PTN), 3) refeição rica em gorduras (GOR) e 4) jejum noturno (JN). Essas condições foram intercaladas com intervalos de pelo menos 1 semana e sempre realizadas entre 7 e 11 da manhã, para minimizar variações na  $T_{pele}$  devido aos ritmos circadianos. Apenas para um paratleta que treinava rotineiramente à tarde, a avaliação foi conduzida entre 12 e 16 horas. Os paratletas foram instruídos a seguir uma refeição padronizada antes do teste (ou seja, jantar) para minimizar seus efeitos na avaliação termográfica. Todos os paratletas foram orientados a chegar ao local da intervenção após um JN de 12 horas (Dindorf *et al.*, 2022; Moreira *et al.*, 2017; Nirengi *et al.*, 2019).

Figura 1 - Modelo esquemático do delineamento experimental



Fonte: autoria própria

Os paratletas repousavam na sala com temperatura controlada vestindo apenas calças ou shorts (as atletas também usando tops esportivos) durante um período de ambientação de 10 minutos (Marins *et al.*, 2014b). A temperatura da pele pré-refeição ( $T_{pre}$ ), medida imediatamente após um período de aclimação de 10 minutos, foi registrada. Após isso, receberam uma refeição padronizada, de acordo com a condição experimental (detalhada abaixo), consumindo-a em até 15 minutos. O experimento teve duração total de 2 horas após o consumo da refeição (Habek *et al.*, 2018; Jalil *et al.*, 2019) ou a manutenção do estado de jejum. Durante esse período, os paratletas permaneceram em repouso enquanto imagens termográficas eram capturadas desde o início das 2 horas de monitoramento (tempo 0), com registros a cada 10 minutos nos primeiros 30 minutos, e a cada 30 minutos nos 90 minutos subsequentes (aos 0, 10, 20, 30, 60, 90 e 120 minutos).

No início do experimento, os paratletas preencheram escala visual analógica (EVA) para dor muscular, percepção subjetiva de recuperação (PSR) os parâmetros de bem-estar (escala de Hooper). Os parâmetros metabólicos medidos incluíram glicemia e CK. A CK foi avaliada em jejum ao chegarem no CTE, antes da aclimação. A glicemia também foi medida em jejum antes da aclimação (valor basal) e, subsequentemente, aos 60 e 120 minutos.

#### 4.2.1 Intervenção nutricional

Durante as intervenções nutricionais, os paratletas consumiram refeições isocalóricas com diferentes composições de macronutrientes em 3 das 4 condições, exceto na condição de JN. O conteúdo calórico de cada refeição foi ajustado individualmente (5.6 kcal/kg de massa corporal), de acordo com as recomendações para refeições pré-treino e considerando possíveis variações de peso entre os paratletas (por exemplo, atletas de baixa estatura e com menor massa corporal) (Kerksick *et al.*, 2018). Cada refeição possuía 80% das calorias provenientes do macronutriente alvo, com os 20% remanescentes divididos igualmente entre os outros dois macronutrientes secundários (i.e. CHO continha 80% das calorias provenientes de carboidratos, 10% de proteínas e 10% de gordura) (Kotopoulea-Nikolaidi; Watkins; Giannopoulou, 2019; Rowlands; Hopkins, 2002). Todas as refeições foram líquidas, a fim de evitar o tempo adicional de digestão de uma refeição sólida. Os detalhes calóricos e nutricionais de cada refeição estão descritos na Tabela 1. Os voluntários tinham 15 minutos para consumir cada refeição e, em seguida, aguardavam 2 horas, período durante o qual as medições eram realizadas. Na condição de JN, os voluntários permaneceram sem ingestão alimentar por um total de 14 horas.

Tabela 1 – Conteúdo calórico e quantidades de macronutrientes por atleta de acordo com o macronutriente-alvo em cada condição

Atleta	Total calórico	CHO	PTN	GOR
1	575,12	115,02	115,02	51,12
2	394,24	78,85	78,85	35,04
3	286,16	57,23	57,23	25,44
4	371,28	74,26	74,26	33
5	440,16	88,03	88,03	39,13
6	462	92,40	92,40	41,07
7	462	92,40	92,40	41,07
8	319,2	63,84	63,84	28,37
9	394,24	78,85	78,85	35,04
10	273,28	54,66	54,66	24,29

Legenda: CHO – refeição rica em carboidrato; PTN – refeição rica em proteína; GOR – refeição rica em gordura

Fonte: autoria própria

A ingestão alimentar do dia anterior foi avaliada por meio de um recordatório 24 horas realizado na chegada ao CTE. Os voluntários foram orientados a manter sua dieta habitual ao longo das 6 semanas do estudo. A dieta do dia anterior seguiu recomendações gerais de diretrizes nutricionais, com carboidratos contribuindo com 45 a 65% do total de calorias diárias, proteínas entre 10 e 35%, e gorduras entre 20 e 35% (Dietary Reference Intakes, 2006). Os valores obtidos a partir dos recordatórios 24 horas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Avaliação do consumo alimentar médio dos voluntários por meio de recordatórios 24-horas

Atleta	Calorias (média ± DP)	%Carboidrato (média ± DP)	%Proteína (média ± DP)	%Gordura (média ± DP)
1	2790,0 ± 815,3	47,7 ± 8,2	20,1 ± 7,7	32,4 ± 6,0
2	2713,5 ± 839,3	45,0 ± 12,5	25,3 ± 8,7	29,8 ± 6,1
3	1794,8 ± 421,6	45,3 ± 9,8	22,9 ± 4,5	29,9 ± 5,2
4	2287,0 ± 709,5	59,1 ± 5,2	13,7 ± 0,5	27,7 ± 3,8
5	2736,7 ± 413,7	57,1 ± 2,0	18,6 ± 2,7	24,2 ± 5,2
6	1692,3 ± 480,1	61,5 ± 7,2	11,4 ± 3,8	29,0 ± 3,5
7	2304,0 ± 265,9	61,2 ± 3,9	10,6 ± 3,9	29,7 ± 4,1
8	1994,8 ± 343,3	56,8 ± 8,3	16,5 ± 3,1	26,3 ± 5,0
9	1827,5 ± 679,2	52,0 ± 5,4	17,1 ± 3,7	30,6 ± 4,0
10	2456,3 ± 611,7	46,6 ± 8,1	23,8 ± 1,8	29,5 ± 8,4

Legenda: %Carboidrato – percentual de calorias provenientes de carboidratos; %Proteína – percentual de calorias provenientes de proteínas; %Gordura – percentual de calorias provenientes de gordura; DP – desvio-padrão

Fonte: autoria própria

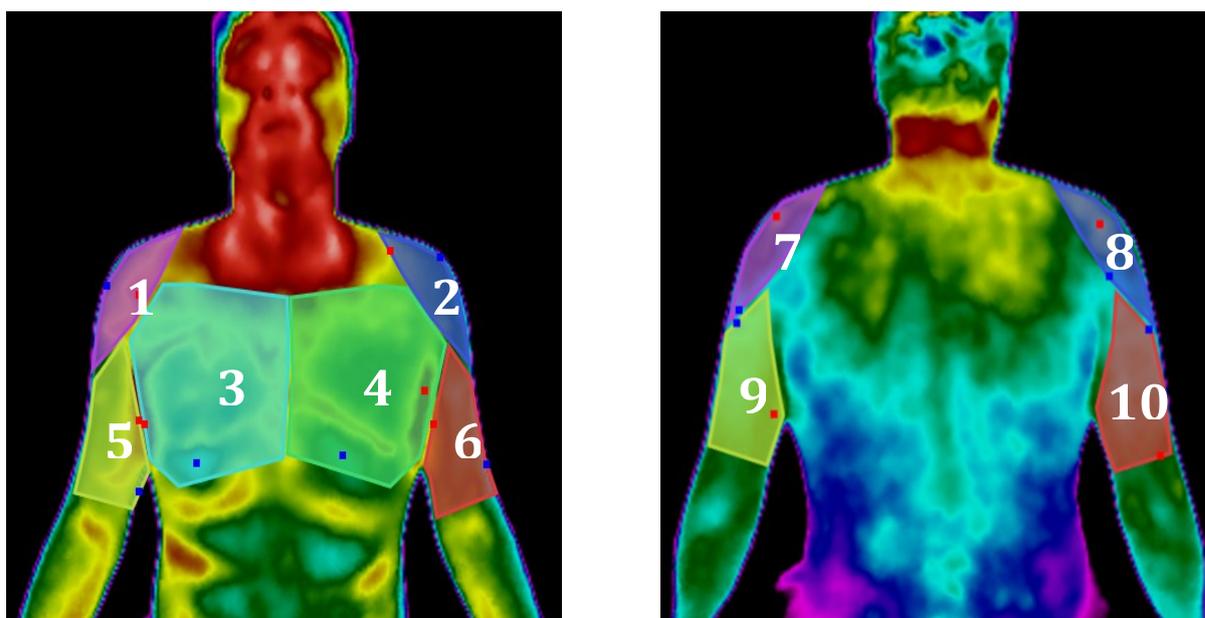
#### 4.2.2 Termografia infravermelha

A  $T_{pele}$  foi medida utilizando uma câmera de TI E8-xT (Teledyne FLIR LLC, Wilsonville, OR, EUA), com resolução de 320 x 240 (76800 pixels), sensibilidade térmica de 50 mK, faixa de temperatura de -20°C a 550°C, intervalo espectral de 7,5 a 13  $\mu$ m e precisão de  $\pm 2^\circ\text{C}$  ou  $\pm 2\%$ . A câmera foi ligada 20 minutos antes das medições para garantir a estabilidade da calibração. Todas as imagens térmicas foram capturadas em um ambiente climatizado com uma  $T_{amb}$  de aproximadamente 25°C e UR de 60%, com um índice de emissividade da pele de 0,98. A câmera foi posicionada a 1,10 m do atleta (Rojas-Valverde *et al.*, 2021). Um tecido preto foi utilizado para eliminar radiação de outras fontes no ambiente experimental. As imagens térmicas foram selecionadas e analisadas utilizando um software específico (APOLLO® versão 1.0, Brasil).

Os atletas foram orientados a evitar álcool, fumar, cafeína, pomadas, cosméticos e banho por quatro horas antes da avaliação. Também foram aconselhados a evitar exposição ao sol (por exemplo, sessões de UV ou luz solar direta sem proteção) antes da avaliação. Para mais detalhes sobre o tempo de aferição das imagens de TI, ver a sessão “Desenho Experimental”.

Para as gravações termográficas, foram selecionados segmentos corporais relevantes para cada esporte, especificamente os membros superiores para lançadores de atletismo (Escamilla; Andrews, 2009) e halterofilismo (Stastny *et al.*, 2017). Os ROIs foram determinados com base nos principais músculos envolvidos nas tarefas motoras e rotinas de treinamento específicas. Isso incluiu os deltoides anterior e posterior, peitorais, bem como os músculos anterior e posterior dos braços. Cada ROI foi avaliada bilateralmente (lados dominante e não dominante) (Figura 2) (Côrte *et al.*, 2019; Fraga *et al.*, 2020). Como resultado, duas imagens de TI foram feitas em cada tempo, totalizando 10 ROIs. Considerando a quantidade de ROIs (10) e os tempo analisados (8) em cada sessão experimental (4), foram gerados 3200 termogramas por voluntário em cada coleta. Foi utilizado a temperatura média de cada ROI como variável dependente.

Figura 2 – ROIs delimitados para análise de termografia infravermelha



Legenda: ROIs, região de interesse; 1 e 2 – ROIs correspondentes às regiões de deltoide anterior; 3 e 4 – ROIs correspondentes às regiões de peitoral; 5 e 6 ROIs correspondentes às regiões de braço anterior; 7 e 8 – ROIs correspondentes às regiões de deltoide posterior; 9 e 10 – ROIs correspondentes às regiões de braço posterior.  
Fonte: autoria própria

#### 4.2.3 Percepção subjetiva de recuperação (PSR), parâmetros de bem-estar, e Escala Visual Analógica (EVA) para dor muscular

A PSR foi avaliada antes de cada sessão utilizando uma escala de 10 pontos, onde '1' indica recuperação pobre/fadiga extrema e '10' indicava recuperação completa/energia (Laurent *et al.*, 2011). Um questionário validado foi utilizado para coletar parâmetros de bem-estar autorrelatados, incluindo qualidade do Sono, Estresse, Fadiga e Dor muscular tardia. Cada parâmetro foi pontuado em uma escala de 7 pontos, de '1' (muito bom) a '7' (muito ruim). O índice de Hooper (IH) foi calculado somando os quatro parâmetros (Hooper; Mackinnon, 1995). A EVA é uma escala contínua ancorada por dois descritores verbais em cada extremidade: 'sem dor' (pontuação 0) e 'pior dor imaginável' (pontuação 10) (Hawker *et al.*, 2011). Essa escala foi usada para quantificar a percepção de dor muscular.

#### 4.2.4 Análise de glicemia capilar e CK

Amostras de sangue capilar (~30 µL) foram coletadas do lóbulo da orelha usando uma lanceta descartável, após a preparação antisséptica com álcool 70%. Para a glicemia, as amostras de sangue foram imediatamente aplicadas em uma tira reagente de glicose e analisadas utilizando o sistema Accutrend® Plus (Roche). Os níveis de CK foram medidos por meio do equipamento Simplex ECO POC (ECO®) (Ferraz; Maia; Araújo, 2004; Knoblauch; O'connor; Clarke, 2010). O avaliador não tinha conhecimento da identidade dos voluntários correspondente a cada amostra.

#### 4.2.5 Deficiências

Nos esportes paralímpicos, os paratletas são categorizados com base no grau de limitação de atividade resultante de suas deficiências (Tweedy; Vanlandewijck, 2011). Para este estudo, os paratletas foram agrupados de acordo com sua classificação funcional. Um paratleta foi classificado como tendo “deficiência visual”. Nove paratletas apresentavam lesão medular, paralisia cerebral e acondroplasia (baixa estatura) e foram classificados com “deficiências físicas”. Embora um dos participantes também possuísse classificação para “deficiência intelectual”, ele foi alocado no grupo de deficiência física, pois sua classificação funcional nas provas de arremesso no atletismo – critério de inclusão deste estudo – foi determinante para essa categorização. No entanto, devido à sua deficiência intelectual combinada, ele não respondeu às avaliações psicométricas, e um responsável forneceu as

demais informações coletadas (como o questionário sociodemográfico e o recordatório alimentar de 24 horas).

#### 4.2.6 Medicacões

As medicações foram agrupadas com base em suas ações farmacológicas comuns e efeitos terapêuticos, conforme descrito em textos padrão de farmacologia e prática clínica. Medicamentos psicotrópicos, incluindo antidepressivos, ansiolíticos, estimulantes do SNC, sedativos/hipnóticos e antiepiléticos, foram agrupados devido aos seus efeitos sobre neurotransmissores e modulação da atividade cerebral (Brunton; Hilal-Dandan; Knollmann, 2018). Medicamentos musculares, como relaxantes musculares e antimuscarínicos, foram agrupados devido à sua influência no tônus muscular e na espasticidade. Contraceptivos foram mantidos como uma categoria separada devido aos seus efeitos hormonais específicos (Hatcher *et al.*, 2017). Esse agrupamento permitiu uma análise de dados mais robusta e simplificada, mantendo a relevância clínica.

#### 4.3 Análise estatística

Para examinar como diferentes macronutrientes afetam agudamente a  $T_{pele}$  ao longo do tempo, foram desenvolvidos modelos de regressão linear mista (ver tópico 3.3.1) com  $T_{pele}$  como variável dependente. Os outliers foram identificados utilizando o método do intervalo interquartil e ajustados por *winsorização* de valores fora do intervalo (Kwak; Kim, 2017). Esse método permitiu uma abordagem mais sutil para exclusão de outliers, selecionando apenas valores extremos sem alterar excessivamente o conjunto de dados (Figura 3.1 e 3.2). As variáveis independentes incluíram as intervenções nutricionais (jejum (controle), CHO, PTN, GOR) e tempo (0, 10, 20, 30, 60, 90 e 120 minutos). Além disso, foram incluídos também os fatores biológicos e ambientais como variáveis independentes. Os fatores biológicos incluídos no modelo foram idade, sexo biológico, deficiências (físicas ou visuais), região de medição (lados dominante e não dominante do peitoral, deltoide anterior e posterior, e braço anterior e posterior – o braço anterior não-dominante como controle) e  $T_{pre}$ . Os fatores ambientais incluídos no modelo foram medicações (psicotrópicos, musculares e contraceptivos), turno da coleta (manhã ou tarde),  $T_{amb}$  (medida em cada tempo de coleta) e UR (registrada uma vez no início do experimento). Dado o desenho cruzado, a ordem de coleta de dados (primeira, segunda, terceira e quarta) também foi considerada. Foram testadas interações entre

intervenções nutricionais e tempo, idade, sexo biológico, turno da coleta, ordem de coleta, deficiências, locais de medição, tempo e medicações.

Figura 3.1 – Impacto dos Outliers na Normalidade dos Resíduos: Comparação dos Gráficos Q-Q Normais - sem outliers.

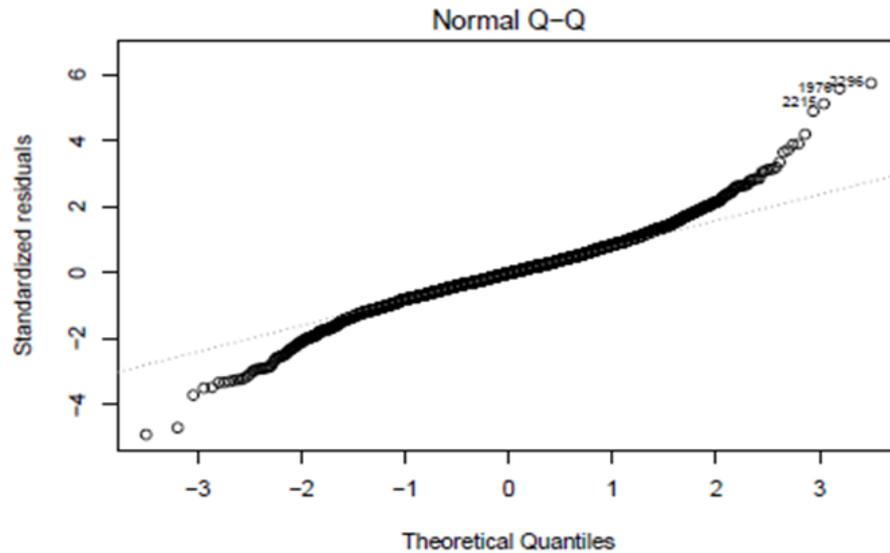
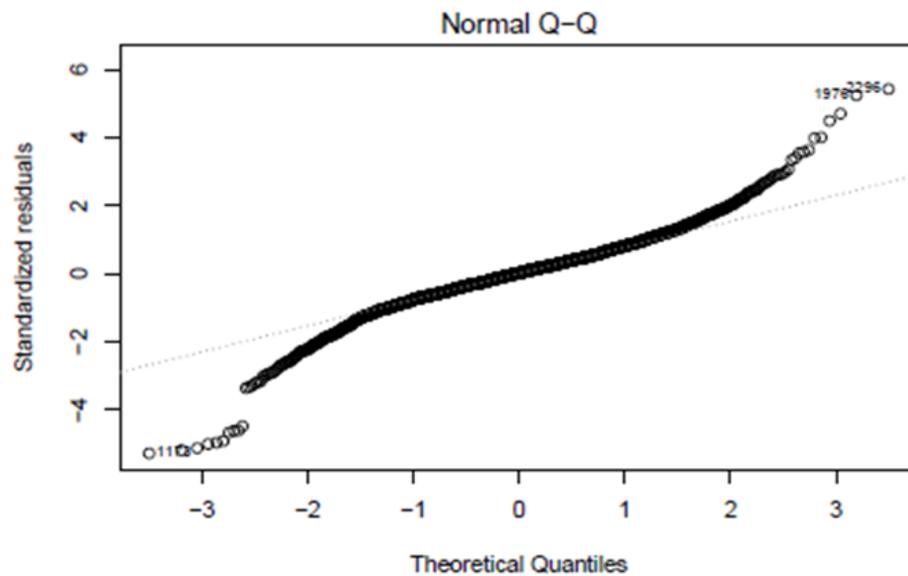


Figura 3.2 – Impacto dos Outliers na Normalidade dos Resíduos: Comparação dos Gráficos Q-Q Normais - com outliers.



Para minimizar possíveis influências da ordem em que as variáveis foram adicionadas ao modelo, foi adotada a seguinte abordagem: primeiro, foram inseridas as variáveis principais, como intervenções nutricionais, tempo, idade, sexo biológico e medicações. Em seguida, foram

adicionadas as variáveis de controle, como turno da coleta, ordem de coleta de dados, deficiências, região de medição,  $T_{amb}$ , UR e  $T_{pre}$ .

A abordagem inicial foi criar um modelo simples, expandindo-o gradualmente para um modelo abrangente que incluía todos os possíveis efeitos fixos. Então, foram introduzidos efeitos aleatórios plausíveis para refinar ainda mais o modelo. Especificamente, foram considerados dois efeitos aleatórios: variações no intercepto entre os participantes (1 | participantes) e variações na inclinação entre os participantes (intervenção nutricional | participantes). Também foi testado um modelo com variações tanto no intercepto quanto na inclinação entre os participantes (1 + intervenção nutricional | participantes). Para avaliar a necessidade dos efeitos aleatórios, esses modelos foram comparados a um modelo sem efeitos aleatórios, avaliando-se o ajuste por meio do Critério de Informação de Akaike (AIC) e da Análise de Variância (ANOVA). Foram preferidos os modelos com valores de AIC mais baixos, sendo considerado um valor de  $p < 0,05$  na ANOVA como indicativo de um ajuste superior do modelo.

Os valores de AIC e ANOVA foram os mesmos para o modelo com efeitos aleatórios na inclinação e para o modelo com efeitos aleatórios tanto no intercepto quanto na inclinação. Assim, seguindo o princípio da parcimônia, adotou-se o modelo com efeitos aleatórios que incluía a variação na inclinação entre os participantes. Então, a análise dos efeitos fixos foi refinada, selecionando o modelo mais ajustado com base nas comparações de AIC e ANOVA. Além disso, foi verificado se o modelo atendia às suposições necessárias para a aplicação da regressão linear mista.

ANOVA *one-way* e ANOVA *two-way* foram utilizados para a análise de CK e glicemia, respectivamente. Testes post hoc de Bonferroni foram realizados para comparações pareadas. A normalidade dos dados foi avaliada usando o teste de Shapiro-Wilk. Para dados com distribuição normal, o teste de ANOVA *one-way* foi utilizado para analisar as variáveis Sono, Estresse, Fadiga, Dor, IH, PSR e EVA. Nos casos em que os dados violaram a suposição de normalidade, o teste de Friedman foi aplicado como uma alternativa não paramétrica. Para análise de correlação entre espessura da dobra cutânea e valores de  $T_{pele}$ , o teste de correlação de Pearson foi utilizado. Os tamanhos de efeito (TE) foram calculados usando eta quadrado ( $\eta^2$ ) para os testes ANOVA e W de Kendall (W) para o teste de Friedman, fornecendo uma medida da magnitude do efeito da intervenção. De acordo com a classificação para  $\eta^2$ , valores entre 0,01 e 0,06 são considerados **pequenos**, entre 0,06 e 0,14 são considerados **moderados** e

valores superiores a 0,14 são considerados **grandes** (Cohen, 1992). Para W, valores entre 0,1 e 0,3 são considerados **pequenos**, entre 0,3 e 0,5 são considerados **moderados**, e valores superiores a 0,5 são considerados **grandes** (Tomczak; Tomczak, 2014). Para os coeficientes de correlação de Pearson, valores entre 0,1 e 0,3 indicam uma correlação **fraca**, entre 0,3 e 0,5 indicam uma correlação **moderada**, e valores superiores a 0,5 indicam uma correlação **forte** (Deprez; Robinson, 2024).

As figuras foram criadas no software GraphPad (versão 8.0.1, San Diego, Califórnia, EUA), e as análises estatísticas foram realizadas no software SPSS (versão 21.0, ©Copyright IBM Corporation 1989, 2012) e no R (versão 4.2.2) com a interface RStudio (versão 2023.06.0+421). Os seguintes pacotes foram utilizados no software R: *pacman*, *readxl*, *dplyr*, *car*, *rstatix* e *nlme*.

#### 4.3.1 Modelo linear misto

O modelo linear misto é uma extensão da regressão linear que permite a análise de estruturas hierárquicas ou medidas repetidas (METEYARD; DAVIES, 2020; SALINAS RUÍZ *Et al.*, 2023), como é o caso do presente estudo. Esse modelo é utilizado quando as observações não são completamente independentes; por exemplo, ao avaliar o desempenho acadêmico de alunos de diferentes turmas, tutorados por diferentes professores, é provável que os alunos de uma mesma turma tenham desempenho similar, já que compartilham o mesmo professor. Outro exemplo é a presença de medidas repetidas, em que os dados podem estar relacionados, pois o mesmo indivíduo contribui para o banco de dados em diferentes momentos, sendo todas as informações referentes a esse mesmo indivíduo. Em casos em que há algum grau de dependência entre as variáveis, é possível modelar a variabilidade ajustando tanto os efeitos fixos (aqueles que têm impacto global sobre a variável resposta ou parâmetros medidos em toda a população) quanto os efeitos aleatórios (aqueles que capturam a variabilidade entre grupos ou indivíduos). No presente estudo, por exemplo, optou-se por tratar como efeito aleatório a variabilidade individual dos atletas em relação à variável dependente ( $T_{pele}$ ), em resposta às intervenções nutricionais. De forma semelhante, consideraram-se como efeitos fixos variáveis como o tipo de intervenção (carboidratos, proteínas, gorduras) e o tempo (minutos após a refeição), ou seja, variáveis comuns a todos os atletas ou inerentes à amostra (como sexo biológico, uso de medicamentos) ou à análise (como a região da medida, por exemplo).

A equação geral de um modelo linear misto pode ser representada como:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_{ij} + b_i + \epsilon_{ij}$$

Onde:

- $Y_{ij}$  é a variável resposta ( $T_{pele}$ ) para o indivíduo  $iii$  na observação  $jjj$ .
- $\beta_0$  é o intercepto fixo (a média global da  $T_{pele}$ ).
- $\beta_1 X_{ij}$  é o efeito fixo de uma variável explicativa (como o tempo ou o tipo de refeição).
- $b_i$  é o efeito aleatório que permite a variação do intercepto para cada indivíduo  $iii$ .
- $\epsilon_{ij}$  é o termo de erro residual, que captura a variação não explicada pelo modelo.

O termo  $\beta_0$  é o intercepto fixo, que representa a média global da variável dependente ( $T_{pele}$ ) quando todas as variáveis explicativas são iguais a zero. Em outras palavras, o intercepto pode ser interpretado como o valor inicial ou ponto de partida estimado para todos os indivíduos na ausência de qualquer variável ou antes do início da contagem de tempo. Já  $\beta_1 X_{ij}$  representa o efeito fixo da variável explicativa  $X_{ij}$ , como o tempo ou o tipo de refeição, sobre a variável resposta. Neste caso,  $\beta_1$  é a inclinação, que descreve o quanto a variável resposta ( $T_{pele}$ ) se altera para cada unidade adicional de  $X_{ij}$ . A inclinação reflete, por exemplo, o impacto do tempo após a refeição na  $T_{pele}$  ou como diferentes tipos de intervenções nutricionais afetam essa resposta. O termo  $b_i$  corresponde ao efeito aleatório, que ajusta o valor do intercepto para cada indivíduo, permitindo que cada atleta tenha um ponto de partida diferente em relação à variável resposta, capturando a variabilidade individual. Por fim,  $\epsilon_{ij}$  é o termo de erro residual, responsável por captar a variação não explicada pelo modelo, ou seja, a parte da variabilidade que não pode ser atribuída nem aos efeitos fixos nem aos aleatórios.

Com esta lógica, a equação geral do modelo, sem as interações, deste estudo pode ser representada como:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 CHO_j + \beta_2 PTN_j + \beta_3 GOR_j + \beta_4 Tempo_j + \beta_5 T_{prej} + \beta_6 Idade_j + \beta_7 SexoBiológico_j + \beta_8 MedPsicotrópico_j + \beta_9 MedMusculares_j + \beta_{10} MedContraceptivo_j + \beta_{11} TurnodaColeta_j + \beta_{12} Deficiência_j + \beta_{13} PeitoralDom_j + \beta_{14} PeitoralNãoDom_j + \beta_{15} DeltoideAnteriorDom_j + \beta_{16} DeltoideAnteriorNãoDom_j + \beta_{17} DeltoidePosteriorDom_j + \beta_{18} DeltoidePosteriorNãoDom_j + \beta_{19} BraçoAnteriorDom_j + \beta_{20} BraçoPosteriorDom_j + \beta_{21} BraçoPosteriorNãoDom_j + \beta_{22} T_{ambj} + \beta_{23} UR_j + \beta_{24} OrdemdaColeta_j + b_i + \epsilon_{ij}$$

Onde:

- $Y_{ij}$ : Temperatura da pele ( $T_{pele}$ ) do indivíduo  $iii$  na observação  $jjj$ .

- $\beta_0$ : Intercepto fixo, representando a  $T_{pele}$  basal.
- $\beta_1CHO_j$ ,  $\beta_2PTN$ ,  $\beta_3GOR_j$ : Efeitos das intervenções nutricionais (carboidratos, proteínas, gorduras), com jejum sendo o grupo de controle.
- $\beta_4Tempo_j$ : Efeito do tempo na intervenção.
- $\beta_5Tpre_j$ : Temperatura imediatamente após a ambientação.
- $\beta_6Idade_j$ : Idade do atleta.
- $\beta_7SexoBiológico_j$ : Sexo biológico do atleta - mulheres foram o controle.
- $\beta_8MedPsicotrópico_j$ ,  $\beta_9MedMusculares_j$ ,  $\beta_{10}MedContraceptivo_j$ : Uso de medicações (psicotrópicos, musculares, contraceptivos) - o não uso de medicamento foi a variável controle.
- $\beta_{11}TurnodaColeta_j$ : Turno da coleta de dados (manhã ou tarde) - manhã foi a variável controle.
- $\beta_{12}Deficiência_j$ : Tipo de deficiência do atleta (física ou visual) - visual foi a deficiência controle.
- $\beta_{13}PeitoralDom_j$ ,  $\beta_{14}PeitoralNãoDom_j$ ,  $\beta_{15}DeltoideAnteriorDom_j$ ,  $\beta_{16}DeltoideAnteriorNãoDom_j$ ,  $\beta_{17}DeltoidePosteriorDom_j$ ,  $\beta_{18}DeltoidePosteriorNãoDom_j$ ,  $\beta_{19}BraçoAnteriorDom_j$ ,  $\beta_{20}BraçoPosteriorDom_j$ ,  $\beta_{21}BraçoPosteriorNãoDom_j$ : Efeitos das diferentes regiões de medição - braço anterior não-dominante foi o controle.
- $\beta_{22}T_{ambj}$ : Temperatura ambiente medida no tempo  $jjj$ .
- $\beta_{23}UR_j$ : Umidade relativa medida no início do experimento.
- $\beta_{24}Ordem_j$ : Ordem da coleta de dados.
- $b_i$ : Efeito aleatório do intercepto para o indivíduo  $iii$ , que permite a variação entre os participantes.
- $\epsilon_{ij}$ : Erro residual, capturando a variação não explicada pelo modelo.

A interpretação dos resultados de um modelo linear misto envolve justamente a análise dos efeitos fixos e aleatórios. O coeficiente  $b$  de um efeito fixo reflete a magnitude de mudança em unidade de medida na variável dependente. Por exemplo, se o coeficiente de um determinado efeito fixo (do tempo, por exemplo) for negativo e significativo, isso sugere que, à medida que o tempo, em minutos, aumenta após a refeição, a temperatura da pele diminui. Já a interpretação dos efeitos aleatórios captura a variação individual. Se o modelo inclui um intercepto aleatório, por exemplo, isso significa que o ponto de partida da  $T_{pele}$  varia entre os indivíduos. Se houver inclinações aleatórias, isso indica que a resposta de cada indivíduo a uma

variável como o tempo também pode variar. Esses efeitos ajudam a ajustar o modelo para a variabilidade individual e tornam os efeitos fixos mais precisos. Além disso, as variáveis do estudo foram analisadas de forma simultânea, o que significa que tanto os efeitos fixos quanto os aleatórios foram avaliados de maneira integrada e concomitante, capturando interações complexas entre as variáveis explicativas e a  $T_{pele}$  ao longo do tempo. Isso assegura que as relações entre as variáveis não sejam tratadas de forma isolada, mas sim como partes de um processo dinâmico, permitindo uma modelagem mais robusta dos dados e uma interpretação mais precisa dos resultados.

No caso de variáveis categóricas, é necessário ressaltar que os fatores fixos - pela natureza da variável - podem assumir um número limitado de categorias ou grupos, como sexo (masculino/feminino), intervenção nutricional (refeição rica em carboidrato/proteína/gordura), ou turno da coleta (manhã/tarde). No modelo, as categorias são codificadas numericamente usando "dummies" ou variáveis binárias (0 ou 1). Uma das categorias é tratada como nível de referência, e os coeficientes estimados para as demais categorias representam a diferença em relação a essa referência. Por exemplo, se a variável categórica é intervenção nutricional e o nível de referência escolhido foi o jejum, o modelo ajusta os coeficientes para as categorias CAR, PTN e GOR. Então, o coeficiente para PTN indica a diferença na  $T_{pele}$  entre as refeições ricas em proteínas e o jejum. Se esse coeficiente for positivo, por exemplo, pode-se concluir que refeições proteicas aumentam a  $T_{pele}$  comparativamente ao jejum.

A interação entre efeitos fixos e aleatórios em modelos lineares mistos permite capturar como o impacto de uma variável fixa pode variar entre diferentes grupos ou indivíduos. Enquanto os efeitos fixos descrevem o comportamento geral das variáveis explicativas em toda a população, os efeitos aleatórios modelam a variabilidade entre os indivíduos ou grupos. Quando há uma interação entre um efeito fixo e um efeito aleatório, isso indica que a influência de uma variável fixa não é constante, mas muda dependendo do indivíduo ou grupo. Por exemplo, ao estudar o impacto do tempo de treinamento no desempenho de atletas, pode-se modelar uma interação entre o tempo (efeito fixo) e a variabilidade individual dos atletas (efeito aleatório). Essa interação permitiria captar que alguns atletas podem melhorar mais rapidamente com o tempo do que outros, refletindo a diferença nas inclinações individuais. Essa flexibilidade torna o modelo misto mais robusto para lidar com variações não capturadas por modelos tradicionais.

O ajuste do modelo linear misto foi realizado para capturar a variabilidade nas respostas de  $T_{pele}$  em resposta às diferentes intervenções nutricionais, considerando tanto os efeitos fixos (como o tipo de refeição e o tempo) quanto os efeitos aleatórios (variabilidade entre indivíduos). Os modelos foram ajustados utilizando o método de máxima verossimilhança restrita (REML), que é adequado para estimar efeitos aleatórios, garantindo que as variâncias dos grupos sejam devidamente modeladas. A comparação dos modelos foi realizada utilizando o AIC, que penaliza a complexidade excessiva do modelo, e o teste de razão de verossimilhança, que compara modelos aninhados para determinar se a adição de efeitos aleatórios, como variações no intercepto e inclinações entre os atletas, melhora significativamente o ajuste. No estudo, foram testados diferentes modelos com variações no intercepto e nas inclinações, sendo selecionado o modelo mais parcimonioso, que incluía a variação na inclinação entre os indivíduos. Essa seleção permitiu capturar como a resposta à intervenção nutricional variava entre os paratletas, garantindo a robustez das estimativas dos efeitos fixos, como o impacto do tempo e do tipo de refeição na  $T_{pele}$ .

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Características da amostra

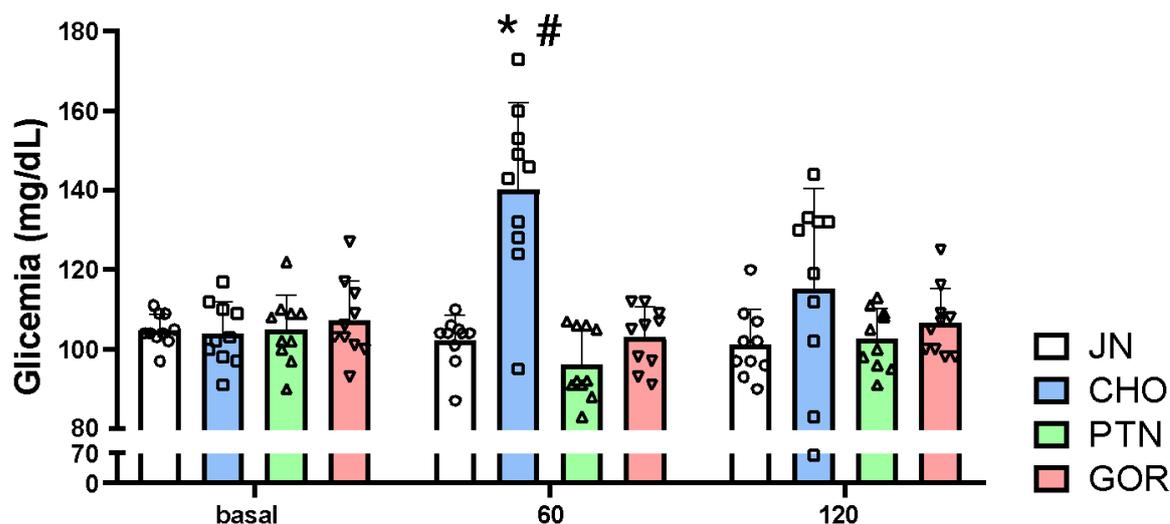
Oito atletas masculinos e duas atletas femininas participaram do estudo (idade:  $30 \pm 10$  anos, massa corporal:  $69,9 \pm 16,9$  kg, altura:  $166 \pm 15,1$  cm, índice de massa corporal:  $25,49 \pm 5,76$ ). Os dados antropométricos, incluindo a soma de 7 dobras cutâneas, bem como o tipo de deficiência e a classificação funcional, estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos atletas

Atleta	Tipo de deficiência*	Condição	Categoria/Classificação funcional#	Sexo	Idade (anos)	Altura (cm)	Massa corporal (kg)	$\Sigma 7$ dobras cutâneas (mm)
1	Física	Força muscular comprometida	Até 107 kg	M	31	171	102,7	186,5
2	Física	Força muscular comprometida	65 a 75 kg	M	32	174	70,4	147,63
3	Física	Baixa estatura	Até 55 kg	F	40	128,5	51,1	163,87
4	Física	Força muscular comprometida	65 a 72 kg	M	40	172,5	66,3	141,27
5	Física	Força muscular comprometida	75 a 80 kg	M	47	185	78,6	102,67
6	Visual	Deficiência visual	F13	F	34	159,5	82,5	218,1
7	Física	Hipertonia	F37	M	28	173,5	82,5	173,33
8	Física	Hipertonia/ Ataxia	F33	M	21	170,5	48,8	39,27
9	Física	Deficiência de amplitude de movimento passiva/Hipertonia	F37	M	17	162	58,6	79,87
10	Física	Hipertonia/ Ataxia	F32	M	15	163,5	57,2	107,93

Legenda: F, feminino; M, masculino; \*Tipo de deficiência elegível. #Código de classificação ou categorias de peso.  $\Sigma 7$  Dobras cutâneas – tríceps, subescapular, peitoral, axilar média, suprailíaca, abdominal e coxa.  
Fonte: autoria própria

## 5.2 A refeição rica em carboidrato aumenta os níveis de glicemia



Como esperado, a análise de ANOVA *two-way* revelou que a glicemia dos atletas na condição CHO aumentou aos 60 minutos em comparação aos valores basais ( $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,306$ ; TE: grande) e foi maior do que nas outras condições ( $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,293$ ; TE: grande) (Figura 4). Não houve alteração na glicemia entre 60 e 120 minutos na condição CHO. A glicemia não foi afetada nas condições PTN, GOR e JN (Figura 4).

Figura 4 – Glicemia em 0, 60 e 120 minutos para jejum, refeições ricas em carboidratos, proteínas e gorduras.

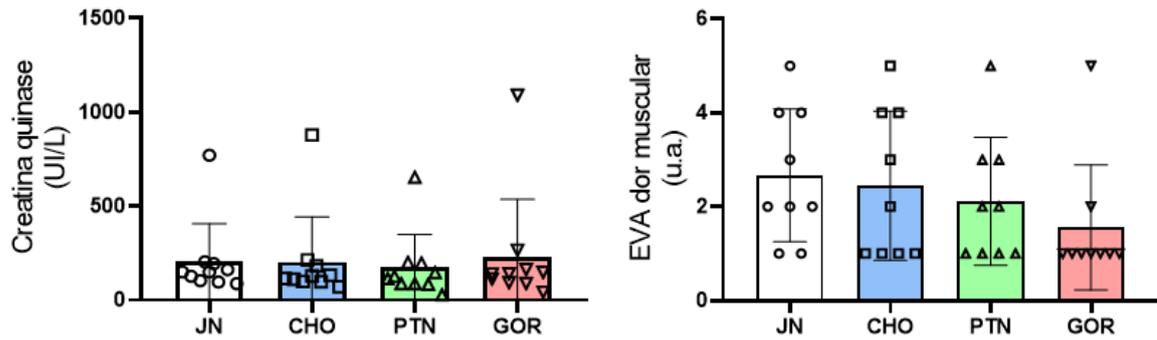
Legenda: \*, Diferença estatística CHO vs. todas as demais condições no mesmo tempo ( $p < 0,01$ ). #, Diferença estatística CHO vs. basal ( $p < 0,01$ ).

Fonte: autoria própria

## 5.3 Os marcadores de dano muscular, dor, bem-estar e recuperação são semelhantes entre as diferentes condições dietéticas

Os resultados não indicaram diferenças estatisticamente significativas no período pré-refeição entre as condições dietéticas para o marcador de dano muscular CK ( $p = 0,965$ ,  $\eta^2 = 0,0074$ , TE: pequeno) e EVA para dor muscular ( $p = 0,161$ ,  $W = 0,191$ , TE: pequeno) (Figura 5.1). O bem-estar percebido, ou seja, Sono ( $p = 0,731$ ,  $\eta^2 = 0,065$ , TE: moderado), Estresse ( $p = 0,881$ ,  $W = 0,0247$ , TE: pequeno), Fadiga ( $p = 0,947$ ,  $W = 0,00136$ , TE: pequeno), Dor ( $p = 0,942$ ,  $W = 0,014$ , TE: pequeno) e IH ( $p = 0,979$ ,  $\eta^2 = 0,0047$ , TE: pequeno), assim como a PSR ( $p = 0,956$ ,  $\eta^2 = 0,0098$ , TE: pequeno), também foram semelhantes entre as diferentes condições dietéticas (Figura 5.2).

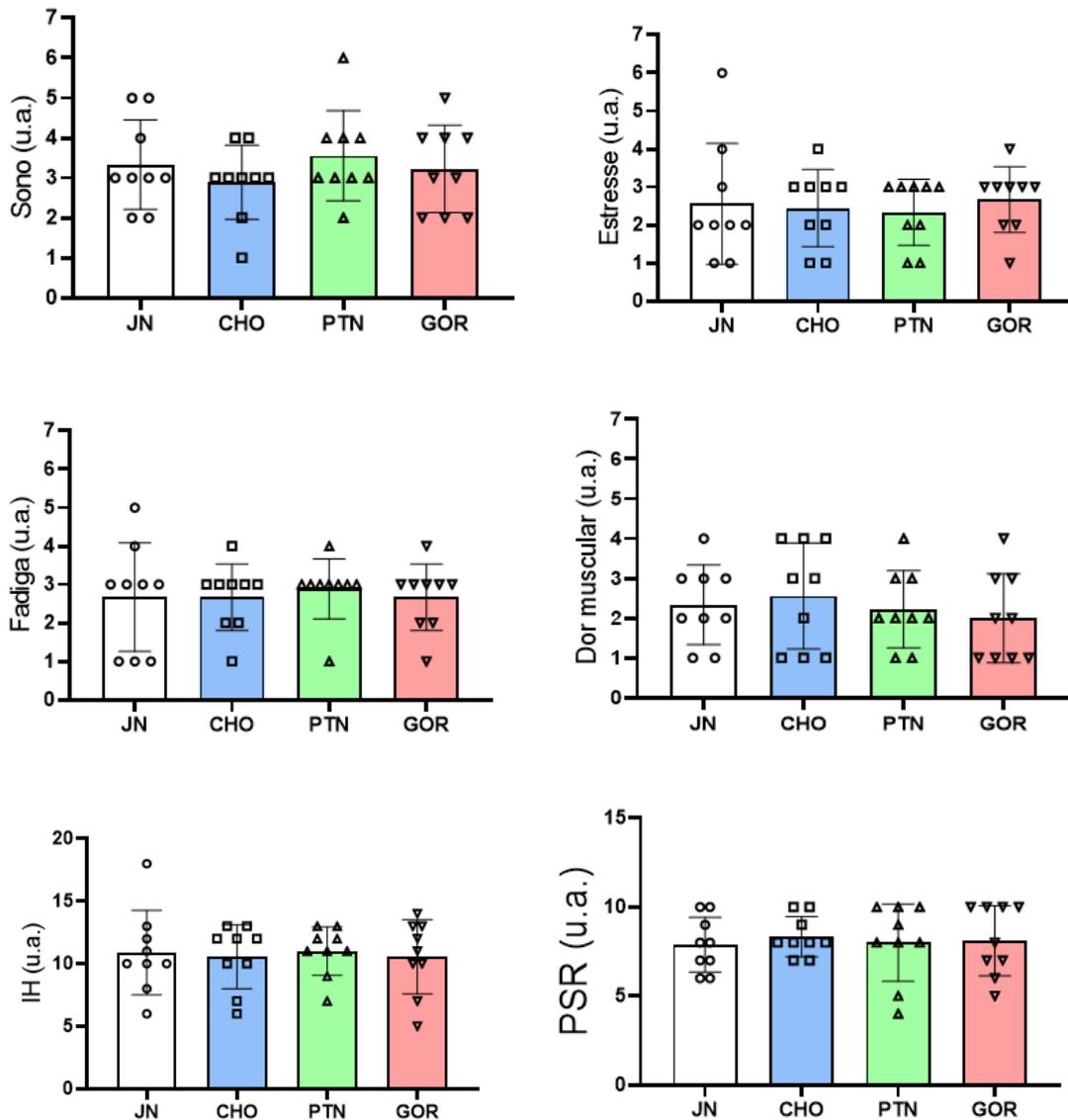
Figura 5.1– CK e Dor muscular avaliada pela escala EVA para dor muscular dos atletas nas quatro condições experimentais.



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura; CK, creatina quinase; EVA, Escala Visual Analógica; u.i., unidades internacionais; u.a., unidades arbitrárias. Análises realizadas por ANOVA *one way* e teste de Friedman, respectivamente.

Fonte: autoria própria

Figura 5.2– PSR e parâmetros de bem-estar dos atletas nas quatro condições experimentais.



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura; Sono, parâmetro de sono de Hooper; Estresse, parâmetro de estresse de Hooper; Fadiga, parâmetro de fadiga de Hooper; Dor muscular, parâmetro de dor muscular de Hooper; IH, índice de Hooper; PSR, Percepção Subjetiva de Recuperação; u.a., unidades arbitrárias. Análises realizadas por ANOVA *one way* e teste de Friedman.

Fonte: autoria própria

#### 5.4 A espessura da dobra cutânea se correlaciona negativamente com a $T_{pele}$

A correlação entre a dobra cutânea do tríceps apresentou uma correlação negativa e forte com os valores de  $T_{pele}$  das regiões de braço posterior dominante ( $p < 0,001$ ;  $r = -0,544$ , alto) e não-dominante ( $p < 0,001$ ;  $r = -0,586$ ).

### 5.5 CHO, PTN e outros fatores ambientais e biológicos influenciam a T<sub>pele</sub>

A Tabela 4 mostra que nosso modelo de regressão linear mista encontrou que o intercepto ( $b = 14,041$ ,  $t = 17,424$ ,  $p < 0,001$ ) foi significativo, indicando que a T<sub>pele</sub> basal foi de 14,041 °C quando todos os preditores eram zero. A T<sub>pele</sub> diminui 0,002 e 0,037 °C, respectivamente, com o aumento de uma unidade no tempo (min) e na idade (anos). Entre as variáveis categóricas, a T<sub>pele</sub> foi 0,293 °C maior em homens do que em mulheres, sugerindo que o sexo biológico afeta a T<sub>pele</sub> (Tabela 4). A T<sub>pele</sub> também foi maior em atletas que tomam medicamentos relacionados aos músculos (0,849 °C) e contraceptivos (0,576 °C) em comparação com aqueles que não tomam nenhum medicamento (Tabela 5).

Tabela 4– Fatores biológicos como variáveis independentes do modelo linear misto

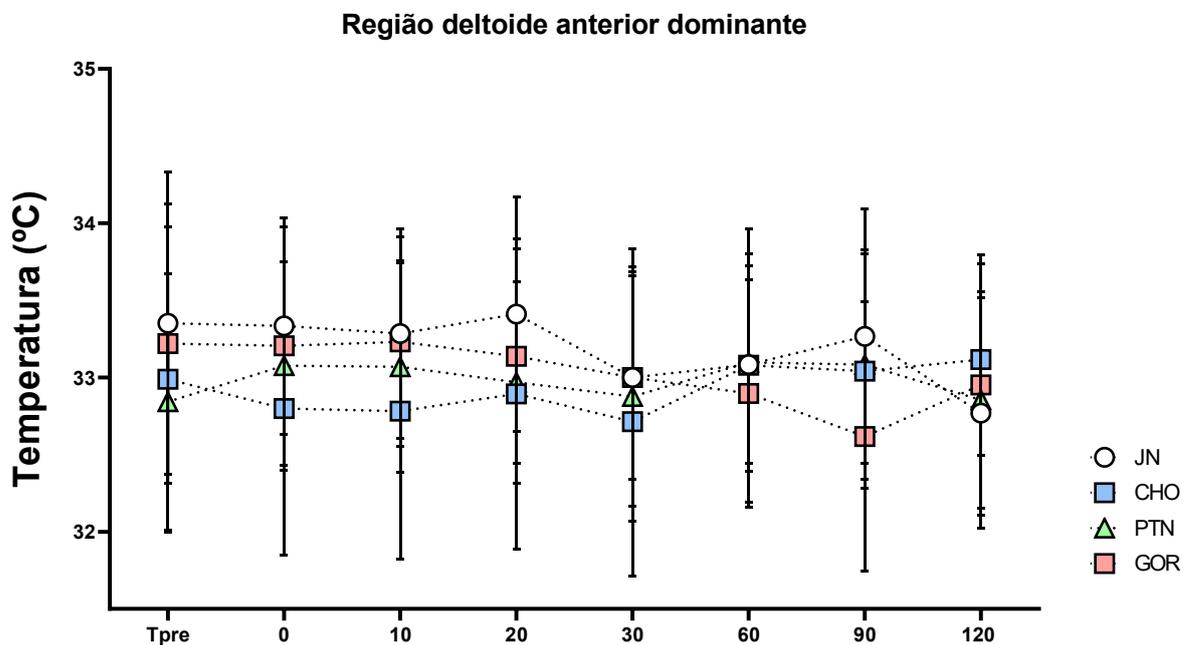
Preditores	b	t	p
Intercepto	14.041	17.424	<0.001**
Tempo	-0.002	-4.676	<0.001**
<i>Variáveis biológicas</i>			
Idade	-0.037	-10.251	0.002*
Sexo biológico (0 homens; 1 mulheres)	0.293	3.52	0.039*
Temperatura pré-refeição (T <sub>pre</sub> )	0.418	21.97	<0.001**
Região: braço dominante anterior	0.234	4.691	<0.001**
Região: braço dominante posterior	-0.775	-15.106	<0.001**
Região: braço não dominante posterior	-0.817	-16.013	<0.001**
Região: deltoide dominante anterior	0.183	3.63	<0.001**
Região: deltoide não dominante anterior	0.084	1.694	0.091
Região: deltoide dominante posterior	-0.173	-3.784	<0.001**
Região: deltoide não dominante posterior	-0.199	-4.346	<0.001**
Região: peitoral dominante	0.191	3.886	<0.001**
Região: peitoral não dominante	0.214	3.974	<0.001**

Legenda: B, coeficiente de magnitude e direção do efeito da variável independente sobre a variável dependente, ajustado pelos efeitos aleatórios e fixos; t, valor de significância e precisão do coeficiente B (calculado por B/Erro padrão de B); p, probabilidade de obter um resultado igual ou mais extremo que o observado, assumindo que a hipótese nula é verdadeira; \*  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.001$ .

Fonte: autoria própria

A  $T_{pele}$  também foi significativamente afetada em diferentes regiões do corpo (Tabela 4). As Figuras 6.1 a 6.10 apresentam uma análise descritiva da  $T_{pele}$  ao longo do tempo nas diferentes ROIs analisadas. A  $T_{pele}$  foi maior no braço anterior dominante (0,234 °C) do que o braço anterior não dominante, considerado a região de controle para todas as análises referentes às regiões do corpo. A  $T_{pele}$  também foi maior no deltoide anterior dominante (0,183 °C), no peitoral dominante (0,191 °C) e no peitoral não dominante (0,214 °C) em comparação com a região de controle. Por outro lado, a  $T_{pele}$  foi menor no braço posterior dominante (0,775 °C) e no braço posterior não dominante (0,817 °C), assim como no deltoide posterior dominante (0,173 °C) e no deltoide posterior não dominante (0,199 °C), em comparação com a região de controle. Esses resultados indicam que as regiões anteriores tendem a apresentar  $T_{pele}$  mais altas do que as regiões posteriores.

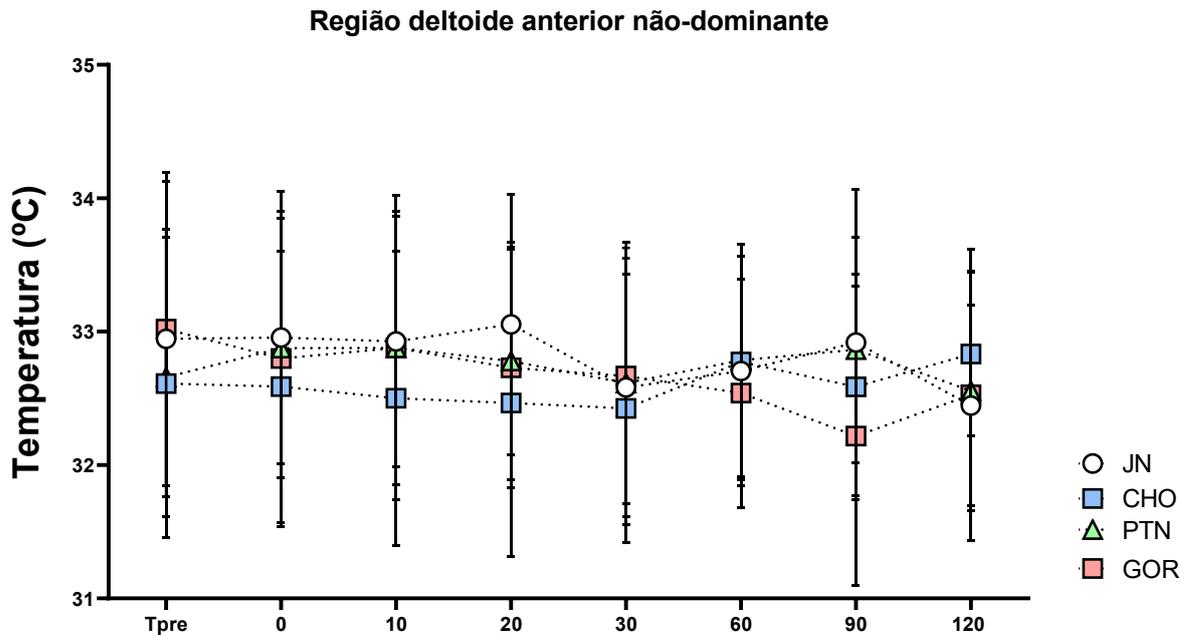
Figura 6.1 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de deltoide anterior dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

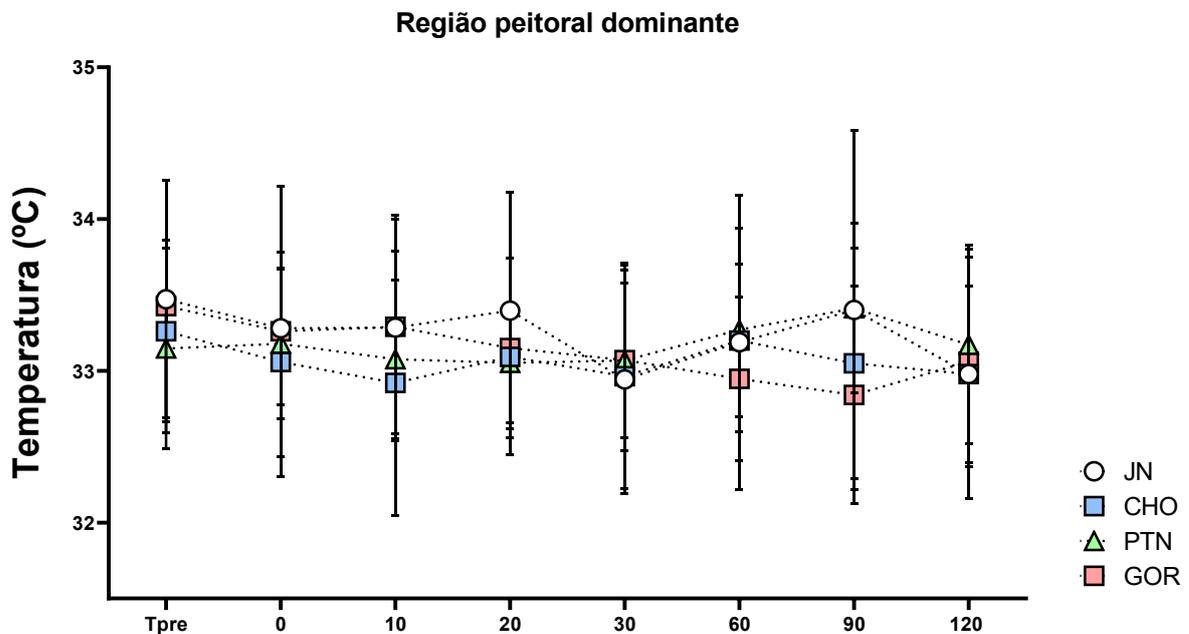
Figura 6.2 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de deltoide anterior não-dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

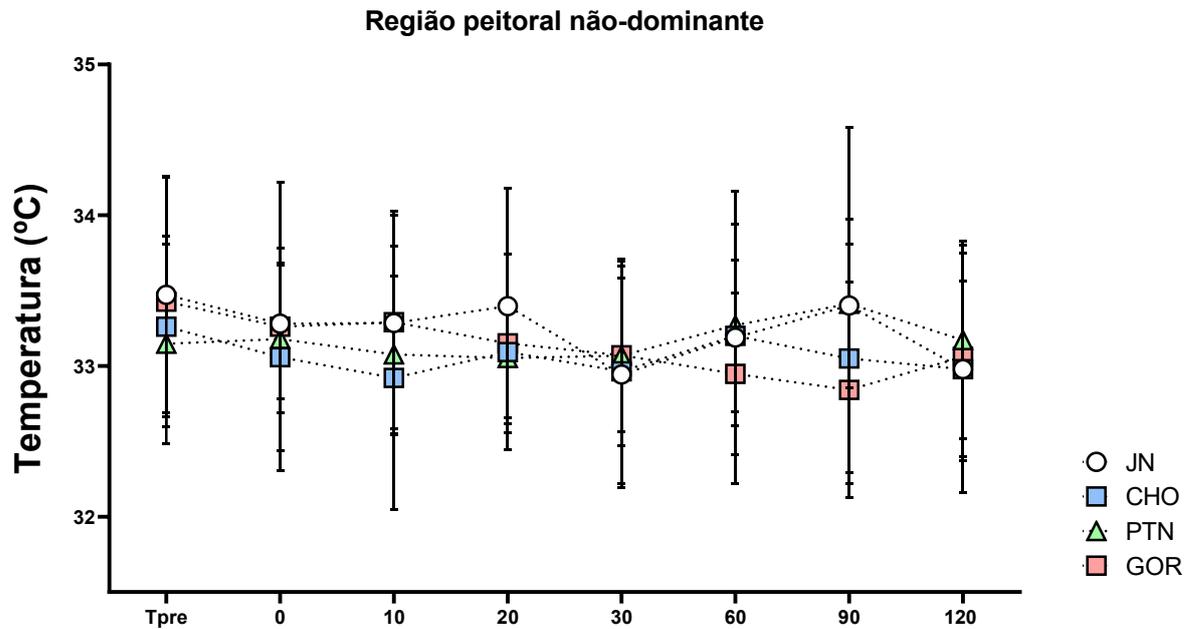
Figura 6.3 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de peitoral dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

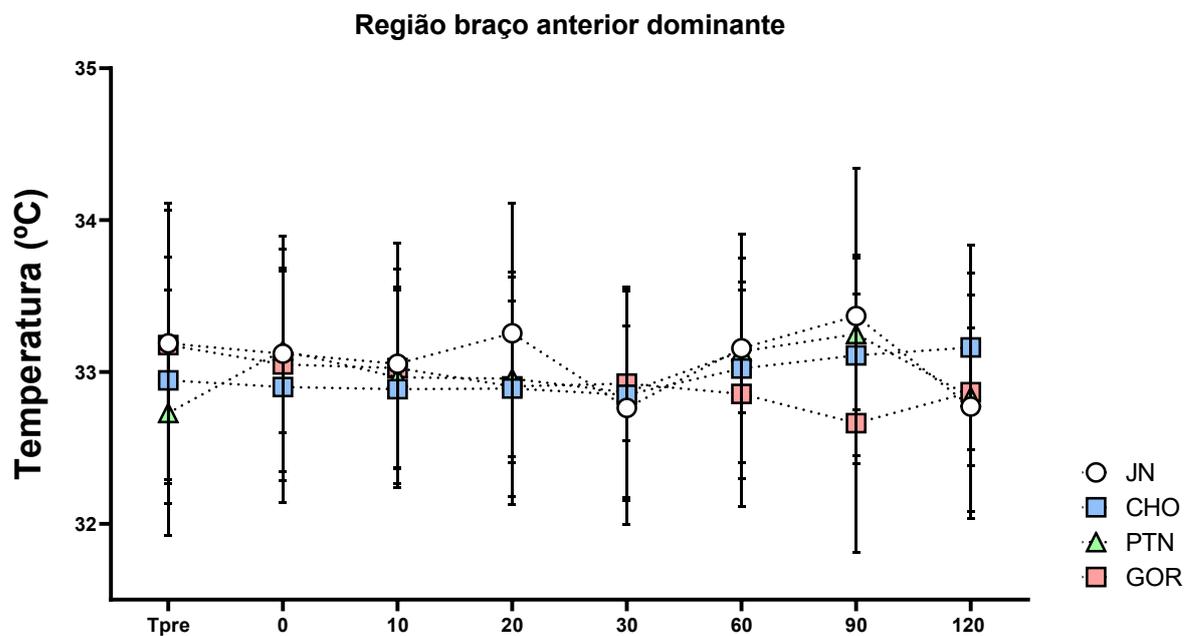
Figura 6.4 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de peitoral não-dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

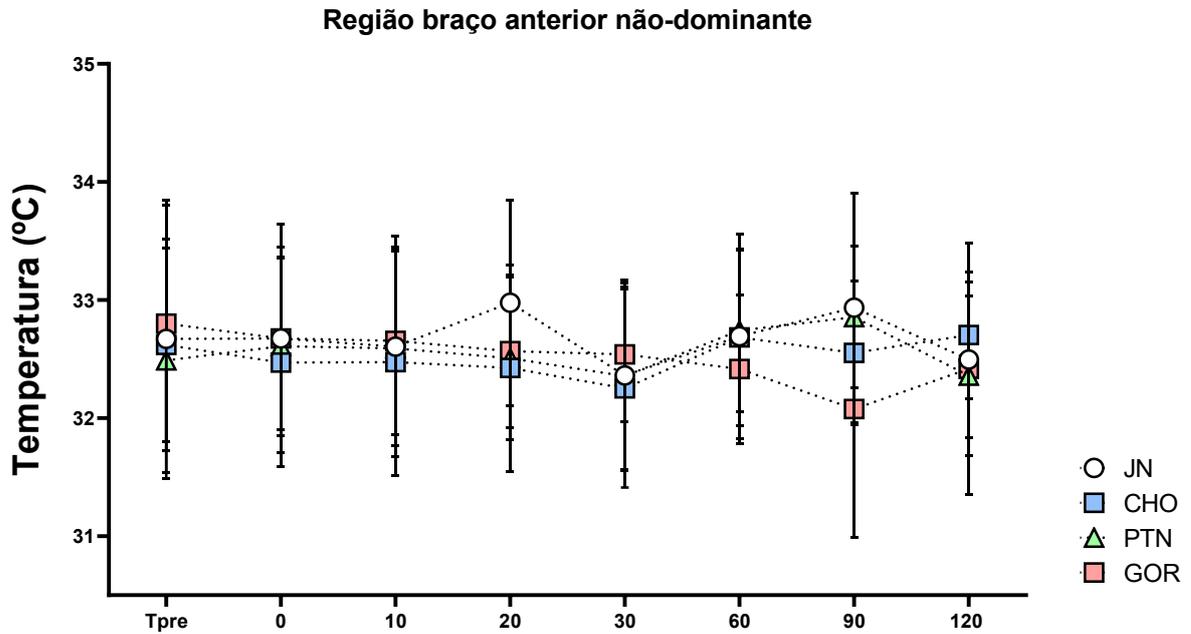
Figura 6.5 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de braço anterior dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

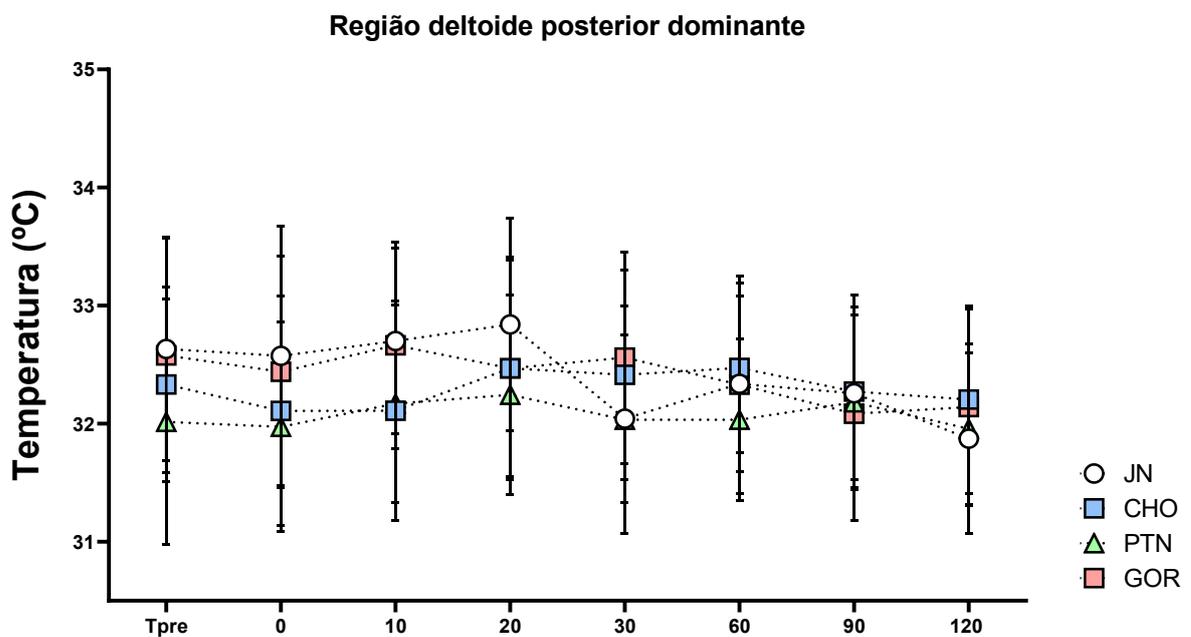
Figura 6.6 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de braço anterior não-dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

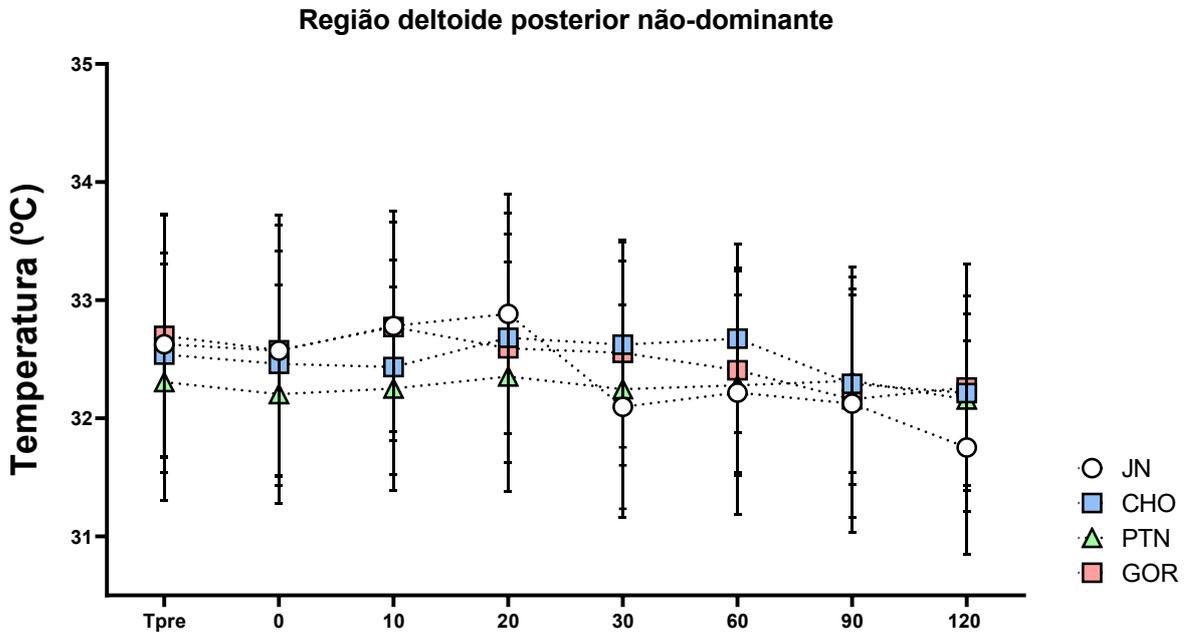
Figura 6.7 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de deltoide posterior dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

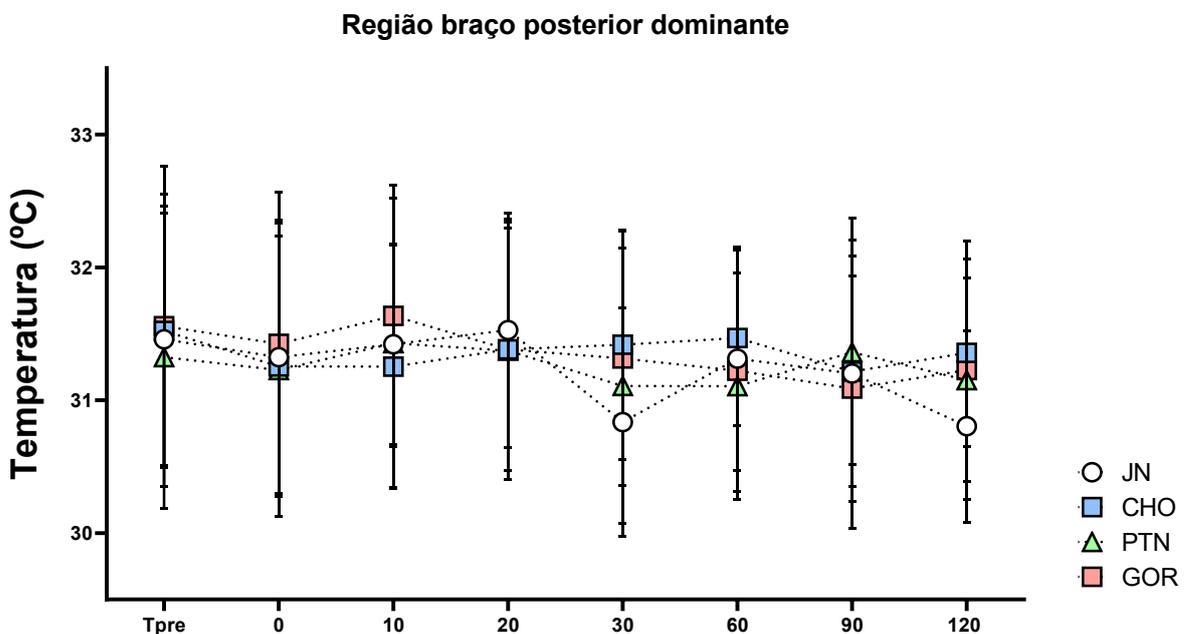
Figura 6.8 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de deltoide posterior não-dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

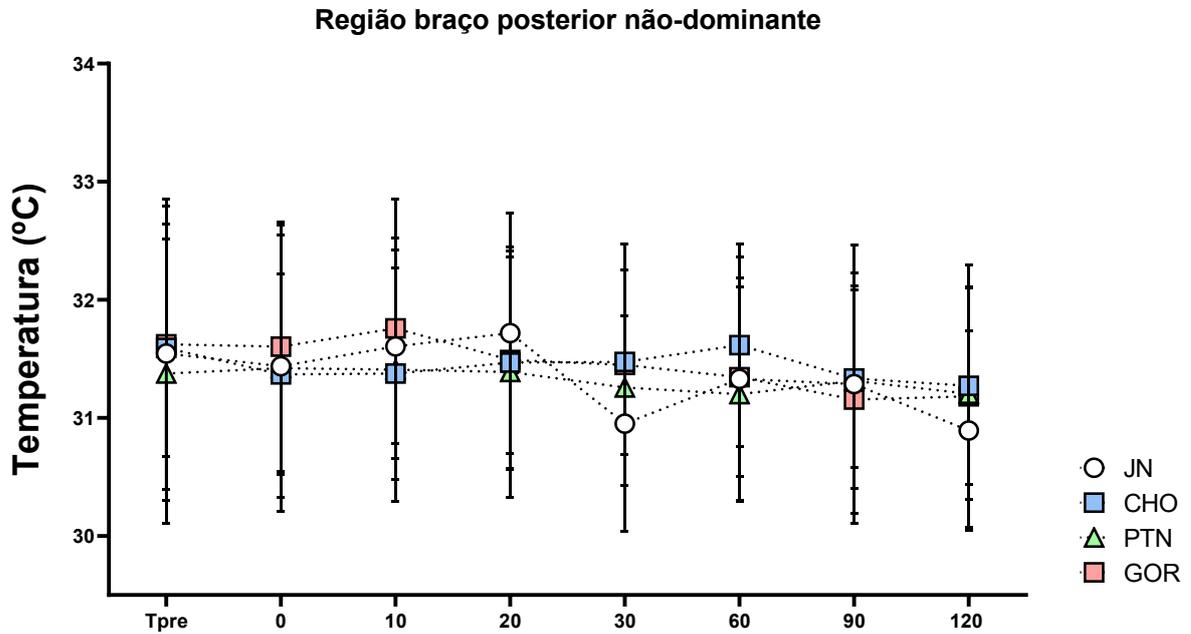
Figura 6.9 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de braço posterior dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

Figura 6.10 – Resposta termográfica ao longo do tempo da região de braço posterior não-dominante entre as quatro condições dietéticas



Legenda: JN, jejum noturno; CHO, refeição rica em carboidrato; PTN, refeição rica em proteína; GOR, refeição rica em gordura.

Fonte: autoria própria

Quanto às variáveis ambientais (Tabela 5), a  $T_{pele}$  aumenta em 0,184, 0,015 e 0,418 °C, respectivamente, quando a  $T_{amb}$  (°C), UR (%), e  $T_{pre}$  (°C) aumentam em uma unidade. A  $T_{pele}$  medida à tarde aumenta 1,096 °C em comparação com os valores obtidos pela manhã.

Tabela 5 – Fatores ambientais como variáveis independentes e interações do modelo linear misto

<i>Preditores</i>	<i>b</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Medicamentos musculares	0.849	12.108	0.001**
Medicamentos psicotrópicos	-0.139	-2.598	0.081
Contraceptivo oral	0.576	6.823	0.006*
Temperatura ambiente ( $T_{amb}$ )	0.184	8.02	<0.001**
Umidade relativa (UR)	0.015	7.357	<0.001**
Turno da coleta (0 manhã; 1 tarde)	1.096	9.203	0.003*
<i>Interações</i>			
Tempo vs. CHO	0.004	7.305	<0.001**
Tempo vs. PTN	0.003	5.339	<0.001**
Idade vs. PTN	0.005	1.842	0.066
Idade vs. GOR	-0.006	-2.86	0.004*
Turno da coleta vs. PTN	0.357	3.196	0.001**
Ordem da coleta de dados vs. CHO	-0.034	-1.054	0.292
Deficiência física vs. PTN	-0.22	-2.951	0.003*
Deficiência física vs. GOR	0.198	2.796	0.005*
Deltoide anterior dominante vs. PTN	0.143	1.812	0.07
Braço anterior dominante vs. GOR	-0.164	-2.055	0.04*
Deltoide anterior não dominante vs. GOR	-0.184	-2.308	0.021*
Peitoral não dominante vs. GOR	-0.151	-1.71	0.087
Tempo vs. Medicamentos psicotrópicos	-0.002	-4.142	<0.001**
Tempo vs. Medicamentos relacionados aos músculos	-0.004	-6.533	<0.001**

Legenda: B, coeficiente de magnitude e direção do efeito da variável independente sobre a variável dependente, ajustado pelos efeitos aleatórios e fixos; t, valor de significância e precisão do coeficiente B (calculado por B/Erro padrão de B); p, probabilidade de obter um resultado igual ou mais extremo que o observado, assumindo que a hipótese nula é verdadeira; \*  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.001$ .

Fonte: autoria própria

Para as interações, a influência do tempo na  $T_{pele}$  foi modulada por vários fatores (Tabela 5). Há interações significativas entre a composição das refeições e o tempo. A interação entre CHO ou PTN e o tempo indicou que a influência do tempo na  $T_{pele}$  aumenta em 0,004 °C e

0,003 °C, respectivamente, com maior ingestão de carboidratos e proteínas, em comparação com JN.

Houve também uma interação significativa entre PTN e dados coletados à tarde (turno da coleta), indicando que a ingestão de PTN à tarde (0,357 °C) tem um efeito mais pronunciado na  $T_{pele}$  do que pela manhã. Além disso, uma interação significativa entre GOR e deficiência física indicou que a ingestão de GOR leva a um aumento de 0,198 °C na  $T_{pele}$  em comparação com o JN, especificamente em atletas com deficiência física em comparação aos com deficiência visual. Por outro lado, várias interações foram associadas à diminuição da  $T_{pele}$  (Tabela 5). A interação entre idade e GOR sugere que o efeito da idade na  $T_{pele}$  diminui (0,006 °C) com maior ingestão de GOR em comparação com JN. Houve uma interação significativa entre PTN e deficiência física, indicando que a ingestão de PTN leva a uma diminuição de 0,22 °C na  $T_{pele}$  em comparação com o JN, especialmente em atletas com deficiência física em comparação aos com deficiência visual.

Além disso, as interações entre GOR e regiões específicas do corpo mostraram diminuições na  $T_{pele}$  no braço anterior dominante (0,164 °C) e no deltoide anterior não dominante (0,184 °C) em comparação com a região de controle, indicando efeitos localizados da ingestão de GOR na  $T_{pele}$  na região anterior do corpo. Nenhum efeito foi observado nas outras regiões do corpo investigadas.

Por fim, interações significativas entre tempo e medicamentos indicaram que medicamentos psicotrópicos (0,002 °C) e medicamentos relacionados aos músculos (0,004 °C) reduzem a  $T_{pele}$  ao longo do tempo em comparação com paratletas que não tomam medicamentos. Quanto às variáveis medicamentos psicotrópicos, embora tenham sido incluídos no modelo devido aos seus menores valores de AIC, os fatores a seguir não foram estatisticamente significativos ( $p > 0,05$ ): deltoide anterior não dominante, e às interações entre idade e PTN, ordem de coleta de dados e CHO, deltoide anterior dominante e PTN, e peitoral não dominante e GOR.

## 6 DISCUSSÃO

Neste estudo preliminar, fomos os primeiros a investigar os efeitos de refeições ricas em diferentes macronutrientes na resposta de TI em paratletas. Nossos resultados demonstram que a ingestão de CHO e PTN, comparado ao JN, aumenta significativamente a  $T_{pele}$  em regiões do corpo correspondentes aos músculos envolvidos nas ações motoras específicas dos esportes dos paratletas. Além dos fatores dietéticos, nossos dados também mostram que a  $T_{pele}$  é significativamente afetada por uma variedade de variáveis biológicas e ambientais, incluindo tempo, idade, sexo biológico, uso de medicamentos,  $T_{amb}$ ,  $T_{pre}$ , UR, regiões do corpo e turno do dia.

Primeiramente, considerando que lesões musculares (Bandeira *et al.*, 2014) ou treinamento físico intenso (Chaves *et al.*, 2024) antes das visitas experimentais poderiam afetar a  $T_{pele}$ , os parâmetros de dano e recuperação foram monitorados para controlar potenciais fatores de confusão na  $T_{pele}$ . Sabe-se que sessões de exercício físico podem influenciar a resposta inflamatória muscular (Meeusen *et al.*, 2013), acompanhada pela dor muscular tardia (Ferreira-Júnior *et al.*, 2021). A avaliação do estado de recuperação deve incluir parâmetros fisiológicos objetivos (como marcadores inflamatórios ou de dano muscular) (Chaves *et al.*, 2024) e psicométricos (como a PSR) (Ferreira-Júnior *et al.*, 2021; Laurent *et al.*, 2011). Neste estudo, avaliamos tanto ferramentas subjetivas, como a PSR e os parâmetros de bem-estar, quanto objetivas, como a CK. A escala de bem-estar proposta por Hooper e Mackinnon (1995) e a escala PSR de Laurent *et al.* (2011) provaram ser eficazes na detecção de mudanças em sono, estresse, fadiga, dor muscular e recuperação em atletas com (Ribeiro Neto *et al.*, 2022) e sem deficiência (Campos *et al.*, 2023). Em nosso estudo, os parâmetros de Sono, Estresse, Fadiga, Dor muscular, IH e PSR não apresentaram diferenças significativas em nenhuma condição, indicando que os paratletas estavam em um estado de recuperação semelhante em todas as visitas experimentais. As lesões musculares induzidas por treinamento físico intenso têm sido associadas a aumentos nos níveis de CK capilar, um marcador objetivo de dano muscular (Knoblauch; O'connor; Clarke, 2010). Assim como os outros marcadores de bem-estar e recuperação, a CK capilar permaneceu inalterada antes de qualquer condição dietética, sugerindo que não houve alterações significativas no dano muscular dos paratletas antes das medições de TI.

A primeira análise de nossa regressão linear mista revelou resultados esperados, porém inovadores, de relevância prática para o esporte e a saúde. Os resultados indicaram que o tempo (em minutos) teve um efeito isolado e significativo na redução da  $T_{pele}$ , isto é, indicaram uma diminuição da  $T_{pele}$  com o passar do tempo. Este resultado está em concordância com os achados

de Schlögl *et al.* (2015) que avaliaram o efeito do jejum em voluntários expostos a um calorímetro indireto de sala inteira por 24 horas. Foi observada uma redução no gasto calórico, possivelmente explicada pela diminuição da atividade metabólica e pela redução na troca de calor (Henderson; Halsey, 2022). Em contrapartida, considerando a condição JN como referência para a análise da interação entre as refeições CHO e PTN com o tempo, observou-se um aumento da  $T_{pele}$  em resposta a essas refeições. Na condição de CHO, o modelo indicou uma variação média de  $0,002^{\circ}\text{C}$  por minuto na  $T_{pele}$ , obtida pela diferença entre o coeficiente da interação CHO vs. tempo ( $0,004^{\circ}\text{C}$ ) e o coeficiente do tempo isolado ( $-0,002^{\circ}\text{C}$ ). Esse achado indica que a ingestão de CHO não somente evita a redução da  $T_{pele}$  ao longo do tempo, mas também aumenta a  $T_{pele}$ , refletindo um efeito termogênico. De forma semelhante, a variação média para a condição de PTN foi de  $0,001^{\circ}\text{C}$  por minuto, calculada a partir da diferença entre interação PTN vs. tempo ( $0,003^{\circ}\text{C}$ ) e o tempo isolado ( $-0,002^{\circ}\text{C}$ ). Assim, tanto CHO quanto PTN demonstraram efeitos termogênicos, elevando a  $T_{pele}$  ao longo do tempo em comparação ao estado de jejum.

Neste contexto, a elevação da  $T_{pele}$  em até  $0,24^{\circ}\text{C}$  ( $0,002^{\circ}\text{C}$  por minuto ao longo de 120 minutos) após o consumo de carboidrato, embora aparentemente pequena, pode ser significativa em estudos que buscam detectar alterações sutis na  $T_{pele}$ . Alguns estudos sugerem que valores de assimetria térmica entre  $0,30$  e  $0,50^{\circ}\text{C}$  podem indicar um risco elevado de alterações fisiopatológicas, como lesões musculares (Gomez Carmona, 2012; Marins *et al.*, 2014a; Moreira *et al.*, 2017). No entanto, se o efeito termogênico dos alimentos — como a elevação de  $0,24^{\circ}\text{C}$  após uma refeição rica em carboidratos — não for considerado, essas variações podem ser interpretadas erroneamente como indicações de questões fisiopatológicas, quando, na realidade, refletem apenas a resposta metabólica pós-prandial.

Considerando então que os efeitos termogênicos encontrados no presente estudo estão associados a macronutrientes insulínogênicos (Kolic *et al.*, 2024), é possível especular um possível efeito termogênico associado a ação da insulina. Corroborando essa hipótese, a glicemia capilar foi medida como um parâmetro de controle metabólico relacionado à ingestão dos diferentes macronutrientes. Como esperado, a glicemia aumentou significativamente 60 minutos após a ingestão de CHO, em comparação aos valores de referência e às outras condições (GOR, PTN e JN). Em contraste, GOR, PTN e JN não apresentaram impacto significativo na glicemia. Além disso, o retorno aos valores basais 120 minutos após a ingestão de CHO indica um efeito esperado da insulina na indução da captação de glicose e na manutenção da homeostase glicêmica (Winn *et al.*, 2024). Habek *et al.* (2018) observaram uma correlação negativa entre a ativação de TAM, avaliada por TI, e os níveis de glicemia 30

minutos após o consumo de uma refeição completa, indicando que a termogênese mediada pelo TAM está associada a uma maior captação de glicose sanguínea. Contudo, o papel termogênico da insulina ainda não é completamente compreendido. Winn *et al.* (2024) observaram que o gasto energético, avaliado por calorimetria indireta, estava positivamente correlacionado com a maior utilização da glicose por meio da glicólise, apenas quando a insulina era administrada. Esses achados sugerem um possível papel termogênico da insulina na homeostase glicêmica.

Outro fenômeno tradicionalmente associado ao aumento do metabolismo em resposta a ingestão de nutrientes é a TID (Saito *et al.*, 2020), que tem sido amplamente estudado ao longo dos anos, através de técnicas como água duplamente marcada e calorimetria direta e indireta (Ho, 2018; Saito *et al.*, 2020). A TID é um componente obrigatório do gasto energético, referindo-se ao aumento no gasto energético que ocorre durante a digestão, absorção e metabolização dos nutrientes. Estima-se que a TID possa contribuir com cerca de 10% do gasto energético total diário (Calcagno *et al.*, 2019). A magnitude deste efeito varia de acordo com o conteúdo calórico da refeição e a composição dos macronutrientes, influenciando diretamente a termogênese da refeição.

Com base nos nossos achados, é possível entender a TI como uma ferramenta sensível para avaliar a termogênese resultante do metabolismo energético e da TID. A premissa que a TI é uma ferramenta capaz de avaliar a TID não é recente. Estudos da década de 80 (Dauncey *et al.*, 1983) e 90 (Shuran; Nelson, 1991) já avaliavam a TI como uma ferramenta sensível para avaliar a resposta térmica pós-prandial. Entretanto, estudos mais recentes já exploraram esse fenômeno: Habek *et al.* (2018) demonstraram que a região supraclavicular, conhecida por conter TAM, apresenta aumento da  $T_{pele}$  em resposta a uma refeição completa contendo todos os macronutrientes comparada com valores basais (pré-refeição) (Habek *et al.*, 2018). Já Jalil *et al.* (2019) investigaram a resposta térmica de mulheres magras e obesas durante um teste de tolerância oral à glicose. O estudo mostrou que a resposta térmica variou não apenas em função do IMC, mas também revelou que mulheres magras exibiram um aumento fisiológico na  $T_{pele}$  ao longo do teste (Jalil *et al.*, 2019), indicando um possível efeito térmico associado ao consumo de carboidrato.

Além disso, a avaliação do efeito térmico dos alimentos por meio da TI já foi realizada em modelos animais. No estudo de Ferreira *et al.* (2011), aves recebendo uma dieta de alta energia apresentaram uma temperatura média da superfície corporal mais baixa (27,97 °C) em comparação com aquelas que consumiram a dieta controle (29,00 °C). Essa diferença sugere que a dieta de alta energia suplementada com óleo reduziu a produção de calor metabólico, resultando em menor perda de calor pela superfície corporal. Já o estudo de McGowan *et al.*

(2020) demonstrou que a administração crônica de uma dieta hiperlipídica em camundongos resultou em um aumento na emissividade da pelagem, observado por meio da TI. Esse efeito foi atribuído a alterações como o aumento da oleosidade dos pelos. Os autores destacam que a predefinição da emissividade sem considerar fatores como dieta, além de variáveis ambientais e comportamentais, pode levar a erros na interpretação dos dados obtidos por termografia (McGowan *et al.*, 2020). Portanto, pode-se ampliar a perspectiva de que a TI não apenas auxilia no monitoramento do treinamento e recuperação de atletas, mas também se revela uma ferramenta sensível para avaliar influências dietéticas agudas.

Além do efeito das refeições, avaliamos as possíveis influências de fatores biológicos na  $T_{pele}$ . Dentre os fatores biológicos, a idade foi outra variável que diminuiu a  $T_{pele}$ . Essa redução pode ser parcialmente explicada pela diminuição do efeito termogênico dos alimentos com o envelhecimento. Du *et al.* (2013) comparou 123 idosos (60–88 anos) com 86 adultos jovens (18–35 anos) e descobriu que, em relação à densidade calórica da refeição, o efeito termogênico dos alimentos avaliado por calorimetria indireta foi significativamente menor nos idosos (6,4% contra 7,3%). Essa diferença persistiu mesmo após ajustes para massa magra, massa de gordura e gordura subcutânea (Du *et al.*, 2013). Ademais, o envelhecimento impacta a eficiência do sistema nervoso autônomo e reduz a produção de hormônios termogênicos, como tiroxina e catecolaminas, diminuindo a produção e conservação de calor (Millyard *et al.*, 2020; Stapleton *et al.*, 2015). Estudos mostram que adultos mais velhos ( $\geq 50$  anos) acumulam mais calor em resposta ao estresse térmico do que adultos mais jovens (19–30 anos) durante o exercício ou durante aquecimento passivo (Kenny *et al.*, 2017). Essas respostas se devem a menor capacidade de perda de calor, causada por uma sudorese atenuada. O envelhecimento também está associado à redução da termogênese mediada por receptores  $\beta$ -adrenérgicos. Kerckhoffs *et al.* (1998) demonstraram que a termogênese mediada por  $\beta$ -adrenérgicos é reduzida em homens mais velhos, mesmo quando expostos a doses elevadas de agonistas  $\beta$ -adrenérgicos seletivos para vias aéreas. Esses indivíduos apresentaram uma menor sensibilidade  $\beta$ -adrenérgica, com respostas termogênicas e cardíacas atenuadas, apesar dos níveis basais elevados de adrenalina e noradrenalina — possivelmente decorrentes de uma sensibilidade adrenérgica reduzida.

Ademais, a resposta pós-prandial de indivíduos idosos é mais lenta, em parte devido à redução de enzimas envolvidas no processo de digestão (Emerson *et al.*, 2018). De fato, verificamos através da interação do fator idade da condição GOR, uma diminuição mais acentuada da  $T_{pele}$  em resposta a GOR. A mudança média na  $T_{pele}$  por minuto era de  $-0,043^{\circ}\text{C}$  (calculada a partir da soma entre o coeficiente b da interação GOR vs. idade, de  $-0,006^{\circ}\text{C}$ , e o

coeficiente da idade isolada, de  $-0,037^{\circ}\text{C}$ ), ou seja, a GOR potencializou os efeitos da idade, provavelmente explicado por uma menor capacidade de metabolização deste nutriente após uma refeição hiperlipídica (Emerson *et al.*, 2018). Embora a contribuição percentual da gordura na TID seja baixa, é importante destacar que essa avaliação é geralmente realizada por calorimetria indireta. A TI, em contrapartida, conseguiu discriminar este fenômeno pela diminuição da  $T_{\text{pele}}$  em reposta a uma refeição hiperlipídica.

Outro fator biológico que impactou significativamente a  $T_{\text{pele}}$  foi o sexo biológico, com a  $T_{\text{pele}}$  dos homens sendo maior que a das mulheres. Isso pode ser decorrente do maior percentual de massa livre gordura ou menor percentual de gordura corporal dos homens, quando comparado com as mulheres (Carvalho *et al.*, 2019). O principal componente da massa livre de gordura é o músculo esquelético, um importante tecido termogênico (Periasamy; Herrera; Reis, 2017). Além disso, sabe-se que a gordura subcutânea atua como um isolante térmico, dificultando a dissipação desse calor para a pele e o ambiente. Nesse contexto, uma maior quantidade de massa muscular e um menor percentual de gordura favorecem tanto a produção quanto a dissipação de calor (Savastano *et al.*, 2009). Neves *et al.* (2015) compararam a resposta de TI antes e após o exercício em homens com diferentes níveis de gordura subcutânea na região dos bíceps. O estudo observou que homens com menor espessura de dobra apresentaram  $T_{\text{pele}}$  basais mais altas do que aqueles com maiores espessuras - e uma maior variação da  $T_{\text{pele}}$  ao longo do protocolo de exercício (Neves *et al.*, 2015).

Em concordância com esta ideia, o trabalho de Marins *et al.* (2014a) também mostrou que existe uma mudança no padrão de resposta TI em homens e mulheres no Brasil, no qual 59% dos 22 ROIs avaliados apresentavam variações relacionadas ao sexo biológico, atribuídas à diferença na composição corporal (Marins *et al.*, 2014a). Corroborando também com os nossos achados, Xu *et al.* (2024) avaliaram a  $T_{\text{pele}}$  e a temperatura corporal central, avaliada por sensor ingerível de monitoramento de temperatura, em homens e mulheres sob diferentes condições ambientais estáveis ( $T_{\text{amb}}$  a 16, 20 ou 24 °C por 30 minutos) e transitórias ( $T_{\text{amb}}$  oscilando entre 19 e 35°C por 130 minutos). O estudo constatou que a temperatura corporal central não apresentou diferenças significativas entre as condições no experimento estável, enquanto a  $T_{\text{pele}}$  variou significativamente com as mudanças de  $T_{\text{amb}}$ , tanto nos experimentos estáveis quanto nos transitórios. De forma notável, quando a  $T_{\text{amb}}$  caiu abaixo de 28°C (se aproximando de um ambiente termoneutro), as mulheres exibiram  $T_{\text{pele}}$  mais baixa do que os homens (Xu *et al.*, 2024). Essa resposta dimórfica entre os sexos pode ser explicada também por influências hormonais, como os efeitos termogênicos da testosterona e do hormônio do crescimento (Gibney *et al.*, 2005), que aumentam o gasto energético e são maiores em homens

do que mulheres (Engström *et al.*, 2002). Embora os hormônios tenham efeitos no metabolismo de macronutrientes, nenhuma interação entre as refeições e o sexo biológico foi encontrada.

No presente estudo, a aferição da  $T_{pele}$  foi influenciada pela região do corpo. Regiões anteriores, como o braço anterior, o deltoide anterior e o peitoral, apresentaram  $T_{pele}$  mais altas em comparação com a região de controle (i.e., braço anterior não-dominante). Em contraste, as regiões posteriores mostraram uma redução na  $T_{pele}$  quando comparadas com a região de controle. Marins *et al.* (2014a) também verificou que regiões como braço posterior apresentaram maior  $T_{pele}$  em homens do que mulheres, explicado provavelmente pela diferença de composição corporal entre homens e mulheres. Para esclarecer essa relação, verificamos que a espessura de dobras cutâneas de tríceps tem uma forte correlação com a temperatura aferida em regiões de braço posterior dominante e não-dominante, indicando que valores altos de dobra são correlacionados à menores valores de  $T_{pele}$ .

Além da diferença de adiposidade regional, é possível que algumas áreas anteriores tenham maior atividade metabólica, visto que estão mais ativamente envolvidas nas tarefas motoras específicas exigidas pelos esportes (De Aquino Resende *et al.*, 2021) dos atletas e consequentemente pelo volume de treinamento associado (Uchôa *et al.*, 2018). Nesse sentido, De Aquino Resende *et al.* (2021) avaliaram o efeito de três protocolos de atividade preparatória em paratletas de halterofilismo, focando nos músculos esqueléticos relacionados ao esporte em regiões anteriores (deltoide e peitoral) e regiões posteriores (tríceps). Notavelmente, apenas a região anterior do peitoral aumentou a  $T_{pele}$  em resposta aos protocolos de preparação, provavelmente devido ao aumento no recrutamento de unidades motoras durante aquecimentos tradicionais (De Aquino Resende *et al.*, 2021). Por outro lado, parece que as regiões anteriores tendem a ter maiores temperaturas devido à maior perfusão sanguínea, facilitada pela presença de grandes vasos e pela proximidade de órgãos vitais, como o coração e os pulmões, o que aumenta a transferência de calor (Bourcier *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2018; Eggenberger *et al.*, 2018). Portanto, parece que a diferença encontrada entre as regiões anteriores e posteriores se deve a localização anatômica de regiões anteriores estarem mais próximas a órgãos vitais como o coração, e a maior quantidade de adiposidade em regiões posteriores, culminando em menores valores de  $T_{pele}$ .

A interação entre a região corporal e GOR foi particularmente relevante, revelando efeitos termogênicos localizados influenciados pela ingestão de gordura. Especificamente, tanto o braço anterior dominante quanto o deltoide anterior não-dominante apresentaram uma redução significativa na  $T_{pele}$  após o consumo de uma refeição rica em gordura. O braço anterior dominante registrou uma diminuição de  $0,164^{\circ}\text{C}$ , enquanto o deltoide anterior não-dominante

apresentou uma queda de  $0,184^{\circ}\text{C}$  na  $T_{\text{pele}}$ . Essa alteração pode ser atribuída ao maior tempo necessário para a digestão da gordura (Boland, 2016), o que provavelmente afeta a redistribuição do fluxo sanguíneo em direção aos órgãos viscerais. Como resultado, o fluxo sanguíneo para regiões periféricas mais externas, como braços e ombros, pode diminuir, levando a uma queda na  $T_{\text{pele}}$ . Esses achados destacam como a dinâmica da digestão dos macronutrientes pode influenciar as respostas termográficas locais, reforçando a importância de controlar e padronizar a ingestão dietética pré-aferição de TI.

As deficiências podem impactar o metabolismo das refeições e as respostas termogênicas dos atletas de forma distinta. O presente estudo revelou que a ingestão de PTN e GOR influencia a  $T_{\text{pele}}$  de maneira diferente em atletas com deficiências físicas em comparação aos atletas com deficiência visual (controle). Observamos que a PTN tende a reduzir a  $T_{\text{pele}}$ , enquanto a GOR leva a um aumento da  $T_{\text{pele}}$  nesses atletas. Tanto a paralisia cerebral quanto a lesão medular – deficiências físicas – impactam significativamente o funcionamento do trato gastrointestinal. Na paralisia cerebral, as lesões neurológicas comprometem o controle motor e sensorial, resultando em dificuldades como disfagia, refluxo gastroesofágico e constipação, devido à descoordenação motora e ao comprometimento das vias nervosas que controlam os reflexos digestivos (Araújo; Silva; Mendes, 2012). Já na lesão medular, as lesões interrompem as vias autonômicas responsáveis pelos reflexos motores e secretórios do trato gastrointestinal (Holmes; Blanke, 2019). Em ambas as deficiências um quadro clínico comum é o intestino neurogênico, uma disfunção intestinal causada por lesões ou doenças neurológicas, que leva à interrupção ou desregulação dos sinais nervosos que controlam a motilidade intestinal e a evacuação (Rodriguez; Gater, 2022). Assim, a redução na motilidade gastrointestinal resulta em um tempo prolongado para a digestão e absorção dos nutrientes. Por outro lado, a acondroplasia, também caracterizada como deficiência física no presente estudo, geralmente não apresenta comprometimentos gastrointestinais específicos (Sforza *et al.*, 2023).

Considerando então que tanto a gordura quanto a proteína são macronutrientes que requerem processos digestivos mais longos, é possível que a metabolização destes nutrientes seja impactada por quadros de redução da motilidade intestinal. A gordura têm um tempo de digestão mais longo entre os macronutrientes, devido à necessidade de emulsificação, à desaceleração do esvaziamento gástrico e ao complexo processo de absorção e transporte linfático no intestino delgado (Boland, 2016). Por outro lado, as proteínas, justamente por passarem por um extenuante processo de quebra de ligação peptídica, têm uma contribuição significativa para a TID (Calcagno *et al.*, 2019), o que idealmente poderia levar a um aumento maior demanda energética e uma maior produção de calor consequente em comparação com

outros macronutrientes. Surpreendentemente, a ingestão de proteína resultou em uma redução da  $T_{pele}$ . Esta resposta pode estar diretamente relacionada à quantidade de proteínas e gorduras nas refeições experimentais. Como as refeições foram isocalóricas, os voluntários receberam o dobro de proteínas em relação às gorduras, considerando a densidade energética das gorduras (9 kcal/g) e das proteínas (4 kcal/g). Esse ajuste resultou em um menor volume alimentar na condição de GOR, favorecendo uma digestão inicial mais rápida no trato gastrointestinal e uma liberação de energia mais concentrada, o que pode ter elevado a  $T_{pele}$  devido à rápida liberação de calor metabólico na condição GOR.

Outro fator biológico avaliado no presente estudo foi a  $T_{pre}$ , a fim de entender como a  $T_{pele}$  pré-refeição impactaria na resposta metabólica dos voluntários ao longo do estudo. Um dos pontos mais importantes no protocolo de aferição da TI é a ambientação. Esse período inicial tem como objetivo de acalmar o voluntário e introduzi-lo a um ambiente termoneutro, isto é, um ambiente onde não há ganho nem perda de calor com o meio externo, garantindo assim a estabilidade da pressão arterial e da  $T_{pele}$  (Marins *et al.*, 2014b). A definição do período de 10 minutos no presente estudo está em concordância com outros estudos na literatura. O estudo de Bouzas-Marins *et al.* (2014b) avaliou diferentes tempos de ambientação na TI, demonstrando que um tempo de 10 minutos é suficiente para estabilizar a  $T_{pele}$  dos voluntários (Marins *et al.*, 2014b). No entanto, esses achados foram obtidos em pessoas sem deficiência, cujos mecanismos termorregulatórios estão preservados. A literatura sobre estudos com pessoas com deficiência e a resposta de TI ainda é limitada (Sanchez-Jimenez *et al.*, 2022). Por isso, o tempo de ambientação adotado no presente estudo pode ter sido insuficiente para garantir uma adaptação adequada desses atletas, independentemente da  $T_{amb}$  utilizada (Moreira *et al.*, 2017). Essa limitação é evidenciada pela influência da  $T_{pre}$  na  $T_{pele}$ . Portanto, há necessidade de definir protocolos específicos que considerem as particularidades termorregulatórias dos paratletas.

Por fim, em relação aos fatores ambientais, observou-se que mulheres que fazem uso de contraceptivos orais contendo progesterona apresentaram  $T_{pele}$  mais alta em comparação àquelas que não utilizam contraceptivos. Em concordância com os nossos achados, estudos anteriores demonstraram que mulheres que usam contraceptivos orais, especialmente com doses mais elevadas de progestágeno, exibem uma maior amplitude na  $T_{pele}$  distal, avaliada por TI, durante a fase pseudolútea, em comparação com não usuárias (Dittmar; Möllgaard; Engelhard, 2024). Esses efeitos podem estar relacionados a vasodilatação cutânea mediada pelo componente da progesterona e não do estrógeno (Dittmar; Möllgaard; Engelhard, 2024), que favorece a dissipação de calor para a pele e o conseqüente aumento da  $T_{pele}$ . Apesar de ser o possível responsável pelo aumento da temperatura central na fase lútea no ciclo menstrual

fisiológico (Shechter *et al.*, 2011), o papel da progesterona na vasodilatação periférica não é claro. Shechter *et al.* (2011) mostraram que apesar de a progesterona ser responsável pelo aumento da temperatura central, não houve mudanças na  $T_{pele}$  na fase lútea (i.e. com maiores concentrações de progesterona) em relação a fase folicular (i.e. menor, concentração de progesterona) em mulheres que não faziam uso de contraceptivo oral. Contudo, os estrogênios geralmente estão associados à vasodilatação, aumentando a disponibilidade de óxido nítrico a partir do endotélio vascular (Baker; Siboz; Fuller, 2020; Charkoudian; Stachenfeld, 2016). Nesse sentido, Cintron-Colon *et al.* (2019) verificaram que camundongos ovariectomizados com reposição de progesterona apresentaram um leve aumento na temperatura corporal central sob restrição calórica. Em contraste, a reposição de estrogênio mostrou efeitos mais significativos no combate à hipotermia inerente à restrição calórica (Cintron-Colon *et al.*, 2019). Portanto, mais estudos são necessários para entender a complexa relação entre termorregulação e contraceptivos orais na  $T_{pele}$ .

Embora medicamentos de ação muscular, como relaxantes musculares e antimuscarínicos, aumentem a  $T_{pele}$  em comparação com atletas que não fazem uso de medicamentos, sua influência parece diminuir ao longo do tempo, como indicado pela interação entre esses medicamentos e o tempo. A interação entre medicamentos musculares ( $0,849^{\circ}\text{C}$ ) e o tempo ( $-0,002^{\circ}\text{C}$ ) indica que a mudança na  $T_{pele}$  dos atletas que fazem uso desta classe de medicamento é  $0,847^{\circ}\text{C}$  por unidade de tempo, em comparação com os atletas que não fazem uso de nenhum medicamento. Isso indica que o tempo tende a reduzir progressivamente o efeito dos medicamentos na  $T_{pele}$ . Tribukait *et al.* (2010) investigaram o impacto termorregulatório de dois fármacos – dimenidrinato (um anti-histamínico) e escopolamina (um anticolinérgico) – durante uma imersão em água fria de 90 minutos em homens, focando na temperatura corporal central,  $T_{pele}$  e produção de calor. Embora o medicamento anticolinérgico não tenha alterado a termogênese induzida pelo frio, ele atenuou a resposta de vasoconstrição periférica ao frio, avaliada pela diferença de temperatura entre o antebraço e a ponta do dedo não imerso, levando a uma menor conservação de calor (Tribukait *et al.*, 2010).

Além disso, os medicamentos psicotrópicos também apresentaram um efeito de redução da  $T_{pele}$  ao longo do tempo, em comparação com atletas que não fazem uso de medicamentos. Considerando que os medicamentos psicotrópicos incluíram antidepressivos, ansiolíticos, estimulantes do SNC, sedativos/hipnóticos e antiepiléptico, essa resposta pode ser explicada pela ação desses fármacos no SNC, onde muitos atuam reduzindo a atividade simpática ou modulando neurotransmissores, como GABA, serotonina e dopamina, que têm papel crucial na regulação da temperatura corporal (Eide; Tjølsen, 1988; Faunt; Crocker, 1987; Ishiwata *et al.*,

2005; Quéva *et al.*, 2003). A redução da atividade simpática mediada por estes fármacos também pode levar à vasodilatação periférica menos intensa (Fox; Edholm, 1963; Green; Kepchar, 1959) e à diminuição da termogênese (Almundarij; Gavini; Novak, 2017), resultando em uma menor dissipação de calor pela pele. Como os paratletas podem tomar medicamentos relacionados ou não às suas deficiências (Carpentier *et al.*, 2023), esses achados ressaltam a complexidade da interação entre termorregulação e fatores ambientais. Nosso estudo reflete essa complexidade, evidenciando que atletas que utilizam medicamentos musculares tendem a apresentar uma  $T_{pele}$  mais elevada em comparação aos que não fazem uso desses fármacos. No entanto, ao avaliar essa resposta ao longo do tempo, observou-se que a  $T_{pele}$  tende a diminuir gradualmente em usuários de medicamentos musculares e psicotrópicos, sugerindo uma modulação da resposta termorregulatória proporcionada pelo uso contínuo desses medicamentos.

Outros fatores ambientais também influenciaram a  $T_{pele}$  no nosso estudo. O turno da coleta foi um fator significativo que influenciou a  $T_{pele}$ , com valores mais elevados registrados à tarde em comparação com a manhã. Costa *et al.* (2018) identificou que a resposta termográfica em mulheres apresenta variações ao longo do dia. Dentre os ROIs analisados, observou-se que as áreas abdominais e dos braços registraram um pico de temperatura durante o período da tarde, especificamente por volta das 15h00 (Costa *et al.*, 2018), horário que coincide com o momento da coleta dos dados neste estudo. Já Marins *et al.* (2015) verificou que tanto homens quanto mulheres aumentam a  $T_{pele}$  ao longo do dia. Pela manhã, os homens apresentaram  $T_{pele}$  maior do que as mulheres dos 17 dos 21 ROIs analisados. Contudo, essa diferença diminuiu com o passar do dia, e apenas os ROIs correspondentes às regiões das pernas forma maiores em homens do que nas mulheres (Marins *et al.*, 2015). Isso sugere que a  $T_{pele}$  oscila ao longo do dia, provavelmente por conta da influência de hormônios que apresentam ritmicidade circadiana, como o cortisol e a melatonina.

A melatonina, produzida pela glândula pineal em resposta à escuridão, promove vasodilatação nas regiões periféricas do corpo, o que facilita a dissipação de calor para o ambiente, reduzindo a temperatura central do corpo e aumentando a  $T_{pele}$  de regiões distais, como mãos e pés. Esse aumento na  $T_{pele}$  de regiões distais está intimamente relacionado ao processo de indução de sonolência, criando um ambiente fisiológico que favorece a transição para o sono (Kräuchi *et al.*, 2006). Em contrapartida, o cortisol, que atinge seu pico nas primeiras horas da manhã, desempenha um papel fundamental no aumento do metabolismo basal e na produção de calor, contribuindo para a elevação da temperatura corporal e facilitando o processo de despertar (Mohd Azmi *et al.*, 2021). Durante as primeiras horas do dia, os níveis

de melatonina diminuem e os de cortisol aumentam, o que resulta em maior ativação do sistema nervoso simpático e aumento do metabolismo (Mohd Azmi *et al.*, 2021). Com o passar das horas, a proporção entre cortisol e melatonina se estabiliza, modulando o tônus vascular e outros processos fisiológicos ao longo do dia.

Além do efeito observado na resposta da  $T_{pele}$  durante o turno da tarde, identificou-se também a influência de uma refeição rica em proteínas nesse período. A ingestão proteica intensificou os efeitos do turno vespertino, elevando ainda mais a  $T_{pele}$  quando medida à tarde. Algumas evidências indicam que enzimas e hormônios relacionados à digestão e ao metabolismo de proteínas, como a gastrina e a secretina, seguem uma ritmicidade circadiana (Martchenko *et al.*, 2020), o que pode explicar o efeito térmico cumulativo das proteínas nesse período do dia. Ribeiro *et al.* (1998) investigaram como as mudanças na fase circadiana afetam as respostas hormonais e metabólicas pós-prandiais em um ambiente simulado de trabalho por turnos. Um atraso de 9 horas no turno habitual prejudicou as respostas metabólicas a uma refeição altamente calórica, resultando em aumento dos triglicerídeos e redução dos ácidos graxos não esterificados (Ribeiro *et al.*, 1998). Deste modo, a padronização dietética para estudos com TI conduzidos no turno da tarde deve ser ainda mais rigorosa, visto que a dieta causa um efeito aditivo a uma resposta fisiológica de aumento da  $T_{pele}$ .

Quanto aos demais fatores ambientais, como a  $T_{amb}$  e a UR, amplamente documentados na literatura como influências críticas na  $T_{pele}$  (Moreira *et al.*, 2017), ambos demonstraram, de fato, impacto significativo na  $T_{pele}$  no presente estudo. Em ambientes quentes, ocorre vasodilatação periférica, facilitando a dissipação de calor do corpo para o meio externo. Quando a  $T_{amb}$  supera a  $T_{pele}$ , há transferência de calor do ambiente para a pele, elevando a sua temperatura (Périard; Eijsvogels; Daanen, 2021). Em situações prolongadas, o sistema nervoso autônomo é ativado para estimular a sudorese, promovendo a perda de calor por evaporação (Baker, 2019). No entanto, em ambientes com alta UR, a eficiência desse processo evaporativo é comprometida, dificultando a dissipação do calor. Assim, o aumento simultâneo da UR e da  $T_{amb}$  provoca elevações fisiológicas na  $T_{pele}$ , resultando em maior calor irradiado que pode ser captado com precisão pela TI (Moreira *et al.*, 2017).

## 7 CONCLUSÃO

Este estudo oferece a primeira evidência do efeito crítico da ingestão de macronutrientes na  $T_{pele}$  de paratletas. Nossos resultados demonstram que CHO e PTN elevam significativamente a  $T_{pele}$  em regiões correspondentes aos músculos envolvidos nas modalidades esportivas, destacando a necessidade de se considerar a composição das refeições imediatamente antes do registro de TI. Além disso, GOR reduziu a  $T_{pele}$  em regiões específicas, com variações conforme o tipo de deficiência.

Adicionalmente, identificamos que fatores biológicos, como idade, tipo de deficiência e a  $T_{pre}$ , assim como fatores ambientais, como o turno do dia, a  $T_{amb}$  e a UR, modulam as respostas termográficas, evidenciando a necessidade de abordagens personalizadas e criteriosas em estudos futuros.

Esses resultados ampliam a aplicação da TI, demonstrando sua sensibilidade para capturar respostas termorregulatórias e metabólicas a intervenções dietéticas agudas. Assim, reforça-se a importância de padronizar e registrar a ingestão alimentar prévia à TI, tanto para assegurar maior reprodutibilidade em pesquisas quanto para aprimorar a eficiência de exames clínicos.

## REFERÊNCIAS

- ALMUNDARIJ, T. I.; GAVINI, C. K.; NOVAK, C. M. Suppressed sympathetic outflow to skeletal muscle, muscle thermogenesis, and activity energy expenditure with calorie restriction. **Physiological Reports**, v. 5, n. 4, p. e13171, fev. 2017.
- ARAÚJO, L. A.; SILVA, L. R.; MENDES, F. A. A. Digestive tract neural control and gastrointestinal disorders in cerebral palsy. **Jornal de Pediatria**, v. 88, n. 6, p. 455–64, 20 dez. 2012.
- ATAN, Y. S. *et al.* The Effect of Blindness on Biological Rhythms and the Consequences of Circadian Rhythm Disorder. **Turkish Journal of Ophthalmology**, v. 53, n. 2, p. 111–119, 1 abr. 2023.
- BAKER, F. C.; SIBOZA, F.; FULLER, A. Temperature regulation in women: Effects of the menstrual cycle. **Temperature**, v. 7, n. 3, p. 226–262, 2 jul. 2020.
- BAKER, L. B. Physiology of sweat gland function: The roles of sweating and sweat composition in human health. **Temperature**, v. 6, n. 3, p. 211–259, 3 jul. 2019.
- BANDEIRA, F. *et al.* A termografia no apoio ao diagnostico de lesao muscular no esporte. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v. 20, n. 1, p. 59–64, jan. 2014.
- BELLISSIMO, N. *et al.* Effect of Increasing the Dietary Protein Content of Breakfast on Subjective Appetite, Short-Term Food Intake and Diet-Induced Thermogenesis in Children. **Nutrients**, v. 12, n. 10, p. 3025, 2 out. 2020.
- BLONDIN, D. P.; HAMAN, F. Shivering and nonshivering thermogenesis in skeletal muscles. **Handbook of Clinical Neurology**, v. 156, p. 153-173, 2018.
- BOLAND, M. Human digestion – a processing perspective. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 7, p. 2275–2283, 5 maio 2016.
- BORRESEN, J.; IAN LAMBERT, M. The Quantification of Training Load, the Training Response and the Effect on Performance. **Sports Medicine**, v. 39, n. 9, p. 779–795, set. 2009.
- BOULANT, J. A. Role of the Preoptic-Anterior Hypothalamus in Thermoregulation and Fever. **Clinical Infectious Diseases**, v. 31, n. Supplement\_5, p. S157–S161, 1 out. 2000.
- BOURCIER, S. *et al.* Toe-to-room temperature gradient correlates with tissue perfusion and predicts outcome in selected critically ill patients with severe infections. **Annals of Intensive Care**, v. 6, n. 1, p. 63, 11 dez. 2016.
- BOURDON, P. C. *et al.* Monitoring Athlete Training Loads: Consensus Statement. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 12, n. s2, p. S2-161-S2-170, abr. 2017.
- BRUNTON, L. L.; HILAL-DANDAN, R.; KNOLLMANN, B. C. **As Bases Farmacológicas da Terapêutica de Goodman e Gilman**. 13. ed. [s.l.] AMGH, 2018.

CALCAGNO, M. *et al.* The Thermic Effect of Food: A Review. **Journal of the American College of Nutrition**, v. 38, n. 6, p. 547–551, 18 ago. 2019.

CAMARGO, M. G. de; FURLAN, M. M. D. P. The body's physiological response to high temperatures: exercise, temperature extremes and thermal diseases. **Revista Saúde e Pesquisa**, v. 4, n. 1983–1870, p. 278–288, maio 2011.

CAMPOS, B. T. *et al.* Monitoring Training Loads in Judo Athletes: Different Time Courses of Physiological, Neuromuscular, and Perceptual Responses. **International journal of exercise science**, v. 16, n. 6, p. 638–653, 2023.

CARREIRO, A. L. *et al.* The Macronutrients, Appetite, and Energy Intake. **Annual Review of Nutrition**, v. 36, n. 1, p. 73–103, 17 jul. 2016.

CARVALHO, C. J. DE *et al.* Body composition indices in Brazilian adults: age-specific and sex-specific percentile curves. **Archives of Endocrinology and Metabolism**, 15 abr. 2019.

CHARKOUDIAN, N.; STACHENFELD, N. Sex hormone effects on autonomic mechanisms of thermoregulation in humans. **Autonomic Neuroscience**, v. 196, p. 75–80, abr. 2016.

CHAVES, S. F. N. *et al.* IGF-1, C-Reactive Protein, and Skin Temperature Responses to a Non-Contact Team Sport Activity Circuit in Under-20 Elite Soccer Players. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 67, 2024.

CINTRON-COLON, R. *et al.* Gonadal hormones influence core body temperature during calorie restriction. **Temperature**, v. 6, n. 2, p. 158–168, 3 abr. 2019.

CLARK, R. P. Human Skin Temperature and Its Relevance in Physiology and Clinical Assessment. Em: **Recent Advances in Medical Thermology**. Boston, MA: Springer New York, 1984. p. 5–15.

COHEN, J. A power primer. **Psychological Bulletin**, v. 112, n. 1, p. 155–159, 1992.

CÔRTE, A. C. *et al.* Infrared thermography study as a complementary method of screening and prevention of muscle injuries: pilot study. **BMJ Open Sport & Exercise Medicine**, v. 5, n. 1, p. e000431, 3 jan. 2019.

COSTA, C. M. A. *et al.* Daily rhythm of skin temperature of women evaluated by infrared thermal imaging. **Journal of Thermal Biology**, v. 72, p. 1–9, fev. 2018.

DA SILVA, W. *et al.* Can exercise-induced muscle damage be related to changes in skin temperature? **Physiological Measurement**, v. 39, n. 10, p. 104007, 30 out. 2018.

DA SILVA, W. *et al.* Effect of different Volumes of exercise on skin temperature responses over the following 24 hours. **Journal of Thermal Biology**, v. 123, p. 103923, jul. 2024.

DAHMEN, S. R. A obra de Boltzmann em Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 281–295, 2006.

DANIEL, R. M. *et al.* The molecular basis of the effect of temperature on enzyme activity. **Biochemical Journal**, v. 425, n. 2, p. 353–360, 15 jan. 2010.

DAUNCEY, M. J. *et al.* Influence of a meal on skin temperatures estimated from quantitative IR-thermography. **Experientia**, v. 39, n. 8, p. 860–862, ago. 1983.

DAUNCEY, M. J.; BINGHAM, S. A. Dependence of 24 h energy expenditure in man on the composition of the nutrient intake. **British Journal of Nutrition**, v. 50, n. 1, p. 1–13, 9 jul. 1983.

DE AQUINO RESENDE, M. *et al.* Are Strength Indicators and Skin Temperature Affected by the Type of Warm-Up in Paralympic Powerlifting Athletes? **Healthcare**, v. 9, n. 8, p. 923, 22 jul. 2021.

DEPREZ, M.; ROBINSON, E. C. Feature extraction and selection. Em: **Machine Learning for Biomedical Applications**. [s.l.] Elsevier, 2024. p. 175–192.

**Dietary Reference Intakes**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2006.

DINDORF, C. *et al.* Effects of Unilateral Muscle Fatigue on Thermographic Skin Surface Temperature of Back and Abdominal Muscles—A Pilot Study. **Sports**, v. 10, n. 3, p. 41, 8 mar. 2022.

DITTMAR, M.; MÖLLGAARD, L.; ENGELHARD, F. Menstrual cycle phases and dosage of synthetic hormonal contraceptives influence diurnal rhythm characteristics of distal skin temperature. **Chronobiology International**, v. 41, n. 5, p. 684–696, 3 maio 2024.

DU, S. *et al.* The Thermic Effect of Food is Reduced in Older Adults. **Hormone and Metabolic Research**, v. 46, n. 05, p. 365–369, 23 out. 2013.

EGGENBERGER, P. *et al.* Prediction of Core Body Temperature Based on Skin Temperature, Heat Flux, and Heart Rate Under Different Exercise and Clothing Conditions in the Heat in Young Adult Males. **Frontiers in Physiology**, v. 9, 10 dez. 2018.

EIDE, P. K.; TJØLSEN, A. Effects of serotonin receptor antagonists and agonists on the tail-flick response in mice involve altered tail-skin temperature. **Neuropharmacology**, v. 27, n. 9, p. 889–893, set. 1988.

EMERSON, S. R. *et al.* Postprandial Metabolic Responses Differ by Age Group and Physical Activity Level. **The journal of nutrition, health & aging**, v. 22, n. 1, p. 145–153, 6 jan. 2018.

ENGSTRÖM, B. E. *et al.* Ambulatory morning growth hormone concentrations increase in men and decrease in women with age. **Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation**, v. 62, n. 1, p. 25–31, 8 jan. 2002.

ESCAMILLA, R. F.; ANDREWS, J. R. Shoulder Muscle Recruitment Patterns and Related Biomechanics during Upper Extremity Sports. **Sports Medicine**, v. 39, n. 7, p. 569–590, jul. 2009.

ESTEVEES, A. M. *et al.* Avaliação da qualidade de vida e do sono de atletas paralímpicos brasileiros. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v. 21, n. 1, p. 53–56, fev. 2015.

FAGHER, K. *et al.* Prevalence of Sports-Related Injuries and Illnesses in Paralympic Athletes. **PM&R**, v. 12, n. 3, p. 271–280, 23 mar. 2020.

FAUNT, J. E.; CROCKER, A. D. The effects of selective dopamine receptor agonists and antagonists on body temperature in rats. **European Journal of Pharmacology**, v. 133, n. 3, p. 243–247, jan. 1987.

FERRAZ, D. P.; MAIA, F. F. R.; ARAÚJO, L. R. Glicemia capilar em ponta do dedo versus lóbulo de orelha: estudo comparativo dos valores resultantes e preferências dos pacientes. **Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia**, v. 48, n. 3, p. 389–393, jun. 2004.

FERREIRA, V. *et al.* Infrared thermography applied to the evaluation of metabolic heat loss of chicks fed with different energy densities. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, v. 13, n. 2, p. 113–118, jun. 2011.

FERREIRA-JÚNIOR, J. B. *et al.* Is skin temperature associated with muscle recovery status following a single bout of leg press? **Physiological Measurement**, v. 42, n. 3, p. 034002, 1 mar. 2021.

FOX, R. H.; EDHOLM, O. G. Nervous Control Of The Cutaneous Circulation. **British Medical Bulletin**, v. 19, n. 2, p. 110–114, maio 1963.

FRAGA, G. S. *et al.* Effects of ibuprofen intake in muscle damage, body temperature and muscle power in paralympic powerlifting athletes. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 14, p. 1–9, 2 jul. 2020.

GERSHON-COHEN, J. A Short History Of Medical Thermometry\*. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 121, n. 1, p. 4–11, 16 out. 1964.

GIBNEY, J. *et al.* Growth hormone and testosterone interact positively to enhance protein and energy metabolism in hypopituitary men. **American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism**, v. 289, n. 2, p. E266–E271, ago. 2005.

GOMEZ CARMONA, P. M. **Influencia de la información termográfica infrarroja en el protocolo de prevención de lesiones de un equipo de fútbol profesional español**. [s.l.] Universidad Politécnica de Madrid, 2012.

GOWDA, R.; JAFFA, M.; BADJATIA, N. Thermoregulation in brain injury. Em: [s.l.: s.n.]. p. 789–797.

GREEN, H. D.; KEPCHAR, J. H. Control of Peripheral Resistance in Major Systemic Vascular Beds. **Physiological Reviews**, v. 39, n. 3, p. 617–686, 1 jul. 1959.

GRIGGS, K. E. *et al.* Thermoregulation During Intermittent Exercise in Athletes With a Spinal-Cord Injury. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 10, n. 4, p. 469–475, maio 2015.

HABEK, N. *et al.* Infrared thermography, a new method for detection of brown adipose tissue activity after a meal in humans. **Infrared Physics and Technology**, v. 89, p. 271–276, 1 mar. 2018.

HATCHER, ROBERT. A. *et al.* **Contraceptive Technology** . [s.l.] Ardent Media Inc, 2017.

HAWKER, G. A. *et al.* Measures of adult pain: Visual Analog Scale for Pain (VAS Pain), Numeric Rating Scale for Pain (NRS Pain), McGill Pain Questionnaire (MPQ), Short-Form McGill Pain Questionnaire (SF-MPQ), Chronic Pain Grade Scale (CPGS), Short Form-36 Bodily Pain Scale (SF-36 BPS), and Measure of Intermittent and Constant Osteoarthritis Pain (ICOAP). **Arthritis Care & Research**, v. 63, n. S11, 7 nov. 2011.

HENDERSON, M. E. T.; HALSEY, L. G. The metabolic upper critical temperature of the human thermoneutral zone. **Journal of Thermal Biology**, v. 110, p. 103380, dez. 2022.

HIMMS-HAGEN, J. Role of thermogenesis in the regulation of energy balance in relation to obesity. **Canadian Journal of Physiology and Pharmacology**, v. 67, n. 4, p. 394–401, 1 abr. 1989.

HO, K. K. Y. Diet-induced thermogenesis: fake friend or foe? **Journal of Endocrinology**, v. 238, n. 3, p. R185–R191, set. 2018.

HOLMES, G. M.; BLANKE, E. N. Gastrointestinal dysfunction after spinal cord injury. **Experimental Neurology**, v. 320, p. 113009, out. 2019.

HOOPER, S. L.; MACKINNON, L. T. Monitoring Overtraining in Athletes. **Sports Medicine**, v. 20, n. 5, p. 321–327, nov. 1995.

ISHIWATA, T. *et al.* Changes of body temperature and thermoregulatory responses of freely moving rats during GABAergic pharmacological stimulation to the preoptic area and anterior hypothalamus in several ambient temperatures. **Brain Research**, v. 1048, n. 1–2, p. 32–40, jun. 2005.

IWEN, K. A.; OELKRUG, R.; BRABANT, G. Effects of thyroid hormones on thermogenesis and energy partitioning. **Journal of Molecular Endocrinology**, v. 60, n. 3, p. R157–R170, abr. 2018.

JALIL, B. *et al.* A pilot study of infrared thermography based assessment of local skin temperature response in overweight and leanwomen during oral glucose tolerance test. **Journal of Clinical Medicine**, v. 8, n. 2, 1 fev. 2019.

JIANG, L. J. *et al.* A perspective on medical infrared imaging. **Journal of Medical Engineering & Technology**, v. 29, n. 6, p. 257–267, 4 jan. 2005.

KENNY, G. P. *et al.* Hyperthermia and cardiovascular strain during an extreme heat exposure in young versus older adults. **Temperature**, v. 4, n. 1, p. 79–88, 31 mar. 2017.

KENNY, G. P.; JAY, O. Thermometry, Calorimetry, and Mean Body Temperature during Heat Stress. Em: **Comprehensive Physiology**. [s.l.] Wiley, 2013. p. 1689–1719.

KERCKHOFFS, D. A. J. M. *et al.* Effect of aging on  $\beta$ -adrenergically mediated thermogenesis in men. **American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism**, v. 274, n. 6, p. E1075–E1079, 1 jun. 1998.

KERKSICK, C. M. *et al.* ISSN exercise & sports nutrition review update: research & recommendations. **Journal of the International Society of Sports Nutrition**, v. 15, n. 1, 5 jan. 2018.

KESZTYÜS, D. *et al.* Use of Infrared Thermography in Medical Diagnosis, Screening, and Disease Monitoring: A Scoping Review. **Medicina**, v. 59, n. 12, p. 2139, 9 dez. 2023.

KNOBLAUCH, M. A.; O'CONNOR, D. P.; CLARKE, M. S. F. Capillary and venous samples of total creatine kinase are similar after eccentric exercise. **Journal of strength and conditioning research**, v. 24, n. 12, p. 3471–5, dez. 2010.

KOLIC, J. *et al.* Proteomic predictors of individualized nutrient-specific insulin secretion in health and disease. **Cell Metabolism**, v. 36, n. 7, p. 1619- 1633.e5, jul. 2024.

KOTOPOULEA-NIKOLAIDI, M.; WATKINS, E.; GIANNOPOULOU, I. Effects of High Carbohydrate vs. High Protein Pre-exercise Feedings on Psychophysiological Responses to High Intensity Interval Exercise in Overweight Perimenopausal Women. **Frontiers in Nutrition**, v. 5, 22 jan. 2019.

KRÄUCHI, K. *et al.* Thermoregulatory effects of melatonin in relation to sleepiness. **Chronobiology International**, v. 23, n. 1–2, p. 475–484, 7 jan. 2006.

KWAK, S. K.; KIM, J. H. Statistical data preparation: management of missing values and outliers. **Korean Journal of Anesthesiology**, v. 70, n. 4, p. 407, 2017.

LAURENT, C. M. *et al.* A Practical Approach to Monitoring Recovery: Development of a Perceived Recovery Status Scale. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 25, n. 3, p. 620–628, mar. 2011.

MARINS, J. C. B. *et al.* Thermal body patterns for healthy Brazilian adults (male and female). **Journal of Thermal Biology**, v. 42, p. 1–8, maio 2014a.

MARINS, J. C. B. *et al.* Time required to stabilize thermographic images at rest. **Infrared Physics & Technology**, v. 65, p. 30–35, jul. 2014b.

MARINS, J. C. B. *et al.* Circadian and gender differences in skin temperature in militaries by thermography. **Infrared Physics & Technology**, v. 71, p. 322–328, jul. 2015.

MARTCHENKO, A. *et al.* Circadian Rhythms and the Gastrointestinal Tract: Relationship to Metabolism and Gut Hormones. **Endocrinology**, v. 161, n. 12, 1 dez. 2020.

MAZDEYASNA, S.; GHASSEMI, P.; WANG, Q. Best Practices for Body Temperature Measurement with Infrared Thermography: External Factors Affecting Accuracy. **Sensors**, v. 23, n. 18, p. 8011, 21 set. 2023.

- MCGOWAN, N. E. *et al.* Dietary effects on pelage emissivity in mammals: Implications for infrared thermography. **Journal of Thermal Biology**, v. 88, p. 102516, fev. 2020.
- MEEUSEN, R. *et al.* Prevention, Diagnosis, and Treatment of the Overtraining Syndrome. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 45, n. 1, p. 186–205, jan. 2013.
- METEYARD, L.; DAVIES, R. A. I. Best practice guidance for linear mixed-effects models in psychological science. **Journal of Memory and Language**, v. 112, p. 104092, jun. 2020.
- MILLYARD, A. *et al.* Impairments to Thermoregulation in the Elderly During Heat Exposure Events. **Gerontology and Geriatric Medicine**, v. 6, 15 jan. 2020.
- MOHD AZMI, N. A. S. *et al.* Cortisol on Circadian Rhythm and Its Effect on Cardiovascular System. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 2, p. 676, 14 jan. 2021.
- MOREIRA, D. G. *et al.* Thermographic imaging in sports and exercise medicine: A Delphi study and consensus statement on the measurement of human skin temperature. **Journal of Thermal Biology**, v. 69, p. 155–162, out. 2017.
- MOYLE, W. R. *et al.* A Model for Peptide Hormone Action Based upon Measurement of Functional Hormone Binding. Em: **Receptors and Hormone Action**. [s.l.] Elsevier, 1978. p. 221–260.
- NAZARI, S. *et al.* Relative contribution of central and peripheral factors in superficial blood flow regulation following cold exposure. **Physiology and Pharmacology**, p. 89–100, 30 mar. 2020.
- NEHME, J. *et al.* The effects of macronutrients metabolism on cellular and organismal aging. **Biomedical Journal**, v. 46, n. 3, p. 100585, jun. 2023.
- NEVES, E. B. *et al.* The influence of subcutaneous fat in the skin temperature variation rate during exercise. **Research on Biomedical Engineering**, v. 31, n. 4, p. 307–312, 27 nov. 2015.
- NIRENGI, S. *et al.* An optimal condition for the evaluation of human brown adipose tissue by infrared thermography. **PLOS ONE**, v. 14, n. 8, p. e0220574, 26 ago. 2019.
- NOVO, M. M. M. *et al.* Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade. **Cerâmica**, v. 60, n. 353, p. 22–33, mar. 2014.
- OWEN, O. E. *et al.* Resting Metabolic Rate and Body Composition of Achondroplastic Dwarfs. **Medicine**, v. 69, n. 1, p. 56, jan. 1990.
- PEAKE, J. M. *et al.* Muscle damage and inflammation during recovery from exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 122, n. 3, p. 559–570, 1 mar. 2017.

PÉRIARD, J. D.; EIJSVOGELS, T. M. H.; DAANEN, H. A. M. Exercise under heat stress: thermoregulation, hydration, performance implications, and mitigation strategies. **Physiological Reviews**, v. 101, n. 4, p. 1873–1979, 1 out. 2021.

PERIASAMY, M.; HERRERA, J. L.; REIS, F. C. G. Skeletal Muscle Thermogenesis and Its Role in Whole Body Energy Metabolism. **Diabetes & Metabolism Journal**, v. 41, n. 5, p. 327, 2017.

PINHEIRO, L. S. P. *et al.* Prevalence and incidence of health problems and their characteristics in Brazilian para athletes: A one-season single-center prospective pilot study. **Disability and Health Journal**, v. 17, n. 1, p. 101511, jan. 2024.

PODOLSKY, R. J.; MORALES, M. F. THE ENTHALPY CHANGE OF ADENOSINE TRIPHOSPHATE HYDROLYSIS. **Journal of Biological Chemistry**, v. 218, n. 2, p. 945–959, fev. 1956.

PRICE, M. J.; TRBOVICH, M. Thermoregulation following spinal cord injury. Em: [s.l: s.n.]. p. 799–820.

QUÉVA, C. *et al.* Effects of GABA agonists on body temperature regulation in *GABA<sub>B(1)</sub><sup>-/-</sup>* mice. **British Journal of Pharmacology**, v. 140, n. 2, p. 315–322, 2 set. 2003.

RAMIREZ-GARCIALUNA, J. L. *et al.* Infrared Thermography in Wound Care, Surgery, and Sports Medicine: A Review. **Frontiers in Physiology**, v. 13, 3 mar. 2022.

RIBEIRO, D. *et al.* Altered postprandial hormone and metabolic responses in a simulated shift work environment. **Journal of Endocrinology**, v. 158, n. 3, p. 305–310, 1 set. 1998.

RIBEIRO NETO, F. *et al.* Internal and External Training Workload Quantification in 4 Experienced Paracanoeing Athletes. **Journal of Sport Rehabilitation**, v. 31, n. 2, p. 239–245, 1 fev. 2022.

RING, E. F. J. The historical development of thermometry and thermal imaging in medicine. **Journal of Medical Engineering & Technology**, v. 30, n. 4, p. 192–198, 9 jan. 2006.

RING, E. F. J.; AMMER, K. The technique of infrared imaging in medicine\*. Em: **Infrared Imaging**. [s.l.] IOP Publishing, 2015. p. 1-1-1–10.

RODRIGUEZ, G. M.; GATER, D. R. Neurogenic Bowel and Management after Spinal Cord Injury: A Narrative Review. **Journal of Personalized Medicine**, v. 12, n. 7, p. 1141, 14 jul. 2022.

ROJAS-VALVERDE, D. *et al.* Short-Term Skin Temperature Responses to Endurance Exercise: A Systematic Review of Methods and Future Challenges in the Use of Infrared Thermography. **Life**, v. 11, n. 12, p. 1286, 24 nov. 2021.

ROWLANDS, D. S.; HOPKINS, W. G. Effect of High-Fat, High-Carbohydrate, and High-Protein Meals on Metabolism and Performance during Endurance Cycling. **International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism**, v. 12, n. 3, p. 318–335, set. 2002.

- SACKS, H. *et al.* Parasport: Effects on Musculoskeletal Function and Injury Patterns. **Journal of Bone and Joint Surgery**, v. 104, n. 19, p. 1760–1768, 5 out. 2022.
- SAITO, M. *et al.* Brown Adipose Tissue, Diet-Induced Thermogenesis, and Thermogenic Food Ingredients: From Mice to Men. **Frontiers in Endocrinology**, v. 11, 21 abr. 2020.
- SALINAS RUÍZ, J. *et al.* Generalized Linear Mixed Models for Repeated Measurements. Em: **Generalized Linear Mixed Models with Applications in Agriculture and Biology**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 377–423.
- SANCHEZ-JIMENEZ, J. L. *et al.* Skin temperature measurement in individuals with spinal cord injury during and after exercise: Systematic review. **Journal of Thermal Biology**, v. 105, p. 103146, abr. 2022.
- SARAWADE, A. A.; CHARNIYA, N. N. **Infrared Thermography and its Applications: A Review**. 2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). **Anais...IEEE**, out. 2018.
- SAVASTANO, D. M. *et al.* Adiposity and human regional body temperature. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 90, n. 5, p. 1124–1131, nov. 2009.
- SCHLÖGL, M. *et al.* Energy Expenditure Responses to Fasting and Overfeeding Identify Phenotypes Associated With Weight Change. **Diabetes**, v. 64, n. 11, p. 3680–3689, 1 nov. 2015.
- SFORZA, E. *et al.* What to Expect of Feeding Abilities and Nutritional Aspects in Achondroplasia Patients: A Narrative Review. **Genes**, v. 14, n. 1, p. 199, 12 jan. 2023.
- SHECHTER, A. *et al.* Predominance of Distal Skin Temperature Changes at Sleep Onset across Menstrual and Circadian Phases. **Journal of Biological Rhythms**, v. 26, n. 3, p. 260–270, 31 jun. 2011.
- SHIN, H. I.; JUNG, S. H. Body Fat Distribution and Associated Risk of Cardiovascular Disease in Adults With Cerebral Palsy. **Frontiers in Neurology**, v. 12, 8 dez. 2021.
- SHURAN, M.; NELSON, R. Quantitation of energy expenditure by infrared thermography. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 53, n. 6, p. 1361–1367, jun. 1991.
- SILVA, Andressa; MELLO, Marco Túlio de. **Esporte paralímpico: da organização ao alto rendimento**. São Paulo: Editora dos Editores, 2021.
- STAPLETON, J. M. *et al.* Aging impairs heat loss, but when does it matter? **Journal of Applied Physiology**, v. 118, n. 3, p. 299–309, 1 fev. 2015.
- STASTNY, P. *et al.* A systematic review of surface electromyography analyses of the bench press movement task. **PLoS ONE**, v. 12, n. 2, 1 fev. 2017.
- STEPHENSON, B. T. *et al.* High Thermoregulatory Strain During Competitive Paratriathlon Racing in the Heat. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 15, n. 2, p. 231–237, 1 fev. 2020.

STIELER, E. *et al.* Current Technologies and Practices to Assess External Training Load in Paralympic Sport: A Systematic Review. **Journal of Sport Rehabilitation**, v. 32, n. 6, p. 635–644, 1 ago. 2023.

TOMCZAK, M.; TOMCZAK, E. The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. **TRENDS in Sport Sciences**, v. 1, n. 21, p. 19–25, 2014.

TRIBUKAIT A. *et al.* Effects of anti-histaminic and anti-cholinergic substances on human thermoregulation during cold provocation. **Brain Research Bulletin**, v. 81, n. 1, p. 100–106, jan. 2010.

TUREK, F.; GILLETTE, M. Melatonin, sleep, and circadian rhythms: rationale for development of specific melatonin agonists. **Sleep Medicine**, v. 5, n. 6, p. 523–532, nov. 2004.

TWEEDY, S. M.; VANLANDEWIJCK, Y. C. International Paralympic Committee position stand—background and scientific principles of classification in Paralympic sport. **British Journal of Sports Medicine**, v. 45, n. 4, p. 259–269, abr. 2011.

UCHÔA, P. *et al.* Evaluation of two different resistance training volumes on the skin surface temperature of the elbow flexors assessed by thermography. **Infrared Physics & Technology**, v. 93, p. 178–183, set. 2018.

VAN HOOK, M. J. Temperature effects on synaptic transmission and neuronal function in the visual thalamus. **PLOS ONE**, v. 15, n. 4, p. e0232451, 30 abr. 2020.

VAN MARKEN LICHTENBELT, W. D.; SCHRAUWEN, P. Implications of nonshivering thermogenesis for energy balance regulation in humans. **American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology**, v. 301, n. 2, p. R285–R296, ago. 2011.

VAN MILGEN, J. Modeling Biochemical Aspects of Energy Metabolism in Mammals. **The Journal of Nutrition**, v. 132, n. 10, p. 3195–3202, out. 2002.

VERDUZCO-MENDOZA, A. *et al.* Traumatic brain injury extending to the striatum alters autonomic thermoregulation and hypothalamic monoamines in recovering rats. **Frontiers in Neuroscience**, v. 17, 7 dez. 2023.

WAELEBROECK, M.; VAN OBERGHEN, E.; DE MEYTS, P. Thermodynamics of the interaction of insulin with its receptor. **The Journal of biological chemistry**, v. 254, n. 16, p. 7736–40, 25 ago. 1979.

WINN, N. C. *et al.* Insulin at the intersection of thermoregulation and glucose homeostasis. **Molecular Metabolism**, v. 81, p. 101901, mar. 2024.

XU, X. *et al.* Sex differences in body temperature and thermal perception under stable and transient thermal environments: A comparative study. **Science of The Total Environment**, v. 951, p. 175323, nov. 2024.

## APÊNDICE

**TITLE:** Acute responses of skin temperature to the ingestion of meals with different macronutrient composition in para-athletes: a randomized cross-over study using infrared thermography

**RUNNING HEAD:** Dietary Effects on Skin Temperature

*Carolina Batista Simões<sup>1,2</sup>, Lucas Siqueira-Moraes<sup>1,2</sup>, Marcelo Teixeira de Andrade<sup>3,4</sup>, Gabriel Adler Gomes-Martins<sup>1,2</sup>, Wellington Douglas de Souza<sup>1,2</sup>, Carlos Makleyton Caetano Schuchter<sup>3</sup>, Marcelo Danillo Matos dos Santos<sup>3</sup>, Pedro Humberto Tavares de Melo Silva<sup>3</sup>, Marcos Daniel Motta Drummond<sup>3,5</sup>, Andressa da Silva<sup>3,6</sup>, Marco Túlio de Mello<sup>3,6</sup>, Eduardo Mendonça Pimenta<sup>6</sup>, Dawit Albieiro Pinheiro Gonçalves<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup> Section of Sports Physiology (SFE), Sports Training Center (CTE), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.

<sup>2</sup> Exercise Physiology Laboratory (LAFISE), School of Physical Education, Physiotherapy and Occupational Therapy, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.

<sup>3</sup> Sports Training Center (CTE), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.

<sup>4</sup> Psychology Program, Faculdade de Minas (FAMINAS), Belo Horizonte, MG, Brazil.

<sup>5</sup> Laboratory of Nutrition and Sport Training (LAN), School of Physical Education, Physiotherapy and Occupational Therapy, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.

<sup>6</sup> Center for Studies in Psychobiology and Exercise (CEPE), School of Physical Education, Physiotherapy and Occupational Therapy, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.

Corresponding author:

Dr. Dawit Albieiro Pinheiro Gonçalves

Section of Sports Physiology (SFE) from Sports Training Center (CTE), School of Physical Education, Physiotherapy and Occupational Therapy, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.

Alfredo Camarate avenue, 617 – São Luiz - Zip code 31310-000 - Belo Horizonte - MG - Phone: +55 (31) 3409-3326 - E-mail: dawit@ufmg.br

Carolina Batista Simões

Section of Sports Physiology (SFE) from Sports Training Center (CTE), School of Physical Education, Physiotherapy and Occupational Therapy, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.

Alfredo Camarate avenue, 617 – São Luiz - Zip code 31310-000 - Belo Horizonte - MG - Phone: +55 (31) 3409-3326 - E-mail: carolbatistasm@gmail.com

## ABSTRACT

Infrared thermography (IRT) is a valuable tool in sports science for detecting early changes in skin temperature ( $T_{\text{SKIN}}$ ), which can serve as early indicators of tissue stress; however, its accuracy and reliability are influenced by various factors. Surprisingly, dietary influences remain underexplored in literature. This study investigated  $T_{\text{SKIN}}$  responses in para-athletes using IRT following carbohydrate (CHO), protein (PTN), fat-rich (FAT) meals, and during overnight fasting (OVF). The analysis focused on body regions associated with sport-specific skeletal muscles in para-athletics and para-powerlifting, while also examining the role of biological and environmental factors. Ten para-athletes participated in a randomized crossover study, where  $T_{\text{SKIN}}$  was measured across ten sport-specific body regions at multiple acute time points after isocaloric CHO, PTN, FAT meals, and OVF. Our findings reveal that among biological factors, CHO and PTN, biological sex, initial temperature and specific body regions (such as the anterior arm and pectoral) explained notable increases in  $T_{\text{SKIN}}$ . Conversely, age and the evaluation of posterior regions (such as the arm and deltoid) were associated with decreases in  $T_{\text{SKIN}}$ . Environmental factors, such as afternoon measurements, muscle-related medications, oral contraceptives, ambient temperature, and relative humidity, promoted increases in  $T_{\text{SKIN}}$ , while measurement time led to slight decreases. This study is the first to demonstrate diet-induced thermogenesis effects on  $T_{\text{SKIN}}$  in regions associated with skeletal muscle, expanding IRT's role in assessing metabolic responses. Significant interactions between FAT and body regions, as well as PTN and disabilities and FAT and disabilities, highlight how macronutrients affect  $T_{\text{SKIN}}$  based on para-athletes' specific physiological characteristics, including disabilities. The findings emphasize the complexity of thermoregulatory responses and the importance of standardizing dietary factors in IRT studies. This is critical for ensuring accurate thermal imaging and advancing clinical and performance applications tailored to individual needs.

**Keywords:** diet-induced thermogenesis; metabolism; para-powerlifting; para-athletics; thermoregulation.

## INTRODUCTION

Infrared thermography (IRT) is a noninvasive technique that detects infrared radiation emitted from an object (*e.g.*, human body), which is invisible to the naked eye, and converts it into visible thermal images<sup>1</sup>. IRT has been widely used to measure skin temperature ( $T_{\text{SKIN}}$ ) in specific body regions and identify thermal variations, such as asymmetries between body hemispheres, which may indicate alteration on blood flow, inflammation establishment, muscle injuries development, or other physiological changes<sup>2,3</sup>. For these reasons, IRT has become a valuable tool for monitoring athletes, allowing early detection of stressed areas that could be at risk of injury<sup>4,5</sup>. Studies have shown that establishing specific thresholds for thermal asymmetry can be useful for identifying and preventing injuries. Côte *et al.* (2019) suggested that using an asymmetry threshold of  $0.4^{\circ}\text{C}$  as a criterion for initiating physiotherapeutic intervention significantly reduced injury incidence throughout a soccer season<sup>6</sup>. Other studies and guidelines also establish ranges of asymmetries varying from  $0,30$  to  $0,50^{\circ}\text{C}$  that may indicate injury risks<sup>1,7,8</sup>.

However, IRT measurements can be influenced by several factors, including specific protocol elements like the ambient room temperature ( $T_{\text{AMB}}$ )<sup>9</sup> and the distance between the camera and the volunteer. Individual characteristics such as biological sex<sup>8</sup>, body fat percentage, and body mass index<sup>10</sup> have also been suggested to affect  $T_{\text{SKIN}}$  readings, which should be carefully controlled to ensure accurate and reliable IRT<sup>1</sup>. Understanding and/or mitigating these experimental and biological artifacts are crucial for minimizing measurement errors and enhancing the validity of IRT findings<sup>11</sup>. Among these potential influencing factors, diet stands out as an underexplored variable. Although it may significantly affect IRT measurements<sup>12-14</sup>, current guidelines, and research articles do not adequately address the effect

of dietary intake with the attention it deserves<sup>5,15,16</sup>, ignoring not only the composition of individual macronutrients but also the impact of a complete meal on  $T_{SKIN}$  responses.

This impact might be explained by diet-induced thermogenesis (DIT), which refers to the increase in energy expenditure resulting from the digestion, absorption, and metabolism of nutrients<sup>17</sup>. This metabolic process varies among macronutrients – proteins, carbohydrates, and fats – each contributing to overall energy expenditure differently, with DIT being highest for proteins, followed by carbohydrates, and then fats<sup>18,19</sup>. DIT is well-documented in scientific literature and is typically estimated with indirect calorimetry or positron emission tomography combined with computed tomography<sup>20</sup>. As nutrients are metabolized, the body generates metabolic heat, a byproduct of cellular metabolism<sup>19</sup>. Metabolic heat contributes to the overall thermogenic effect and could affect  $T_{SKIN}$  through heat transfer by conduction between tissues and/or convection through capillary blood flow<sup>21</sup>. The generated heat is primarily conducted to the skin and subsequently lost to the environment through radiation, helping the body maintain thermal balance in the postprandial state<sup>22</sup>. Since  $T_{SKIN}$  changes are closely linked to metabolic activity, factors affecting circulation and energy metabolism, such as DIT, can significantly regulate thermoregulation. Therefore, variations in energy expenditure and metabolic heat production induced by different macronutrients could alter  $T_{SKIN}$  readings, underscoring the need to consider dietary influences in IRT measurements.

Despite the increasing visibility and recognition of Paralympic sports, few studies have explored IRT as a monitoring tool for these athletes<sup>15,23</sup>. Elite para-athletes report a high incidence of sports injuries, illnesses, and other health issues<sup>24</sup>, and compared to non-disabled athletes, these injuries can be even more concerning due to preexisting medical conditions<sup>25</sup>. Para-athletics includes a wide range of track and field events specifically adapted for athletes with physical, visual, or intellectual impairments<sup>26</sup>, while para-powerlifting is a strength-based sport derived from conventional powerlifting, emphasizing the bench press to test maximal

upper body strength. Despite the high prevalence of training-related injuries in these athletes<sup>24</sup>, the thermographic responses of specific body segments in para-athletes are still largely unexplored. To address this gap, the present study aims to evaluate the acute effects of meals rich in different macronutrients on the  $T_{SKIN}$  of body segments in para-athletics and para-powerlifting athletes. Given the higher DIT associated with protein and carbohydrates, we hypothesized that these macronutrient-rich interventions would result in greater  $T_{SKIN}$  elevations than other nutritional conditions.

## **METHODS**

### **Participants**

Ten para-athletes from the Sports Training Center (Centro de Treinamento Esportivo, CTE) at the Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) were recruited. The inclusion criteria were: (1) active competition status at the state, national, or international level within the last 12 months; (2) no episodes of fever, inflammatory processes, or muscle injuries in the last two months; and (3) no food allergies or intolerances. Ethical approval was obtained from the local ethical committee of UFMG (approval number 68427923.8.0000.5149/2023). Participants were informed about the study procedures and objectives and provided with their written consent.

### **Experimental design**

The study was carried out at the CTE from September to December 2023, during the spring season in Brazil, and during a period free from strenuous training and competition schedules. Data collection occurred over six weeks for each para-athlete, divided into four conditions, with a total period of 4 months for completing the data collection. During the initial two weeks, sample characterization was performed, including body composition assessment and familiarization with the IRT protocols. The study employed randomized crossover design (see Figure 1). Each para-athlete experienced the four nutritional intervention conditions: 1)

carbohydrate-rich meal (CHO), 2) protein-rich meal (PTN), 3) fat-rich meal (FAT), and 4) overnight fasting (OVF). These conditions were interspersed with at least 1-week intervals and were always conducted between 7 and 11 a.m. to minimize variations in  $T_{SKIN}$  due to circadian rhythms. For one para-athlete who trained routinely in the afternoon, the assessment was conducted between 12 and 4 p.m. The para-athletes were instructed to follow a standardized meal before the test (*i.e.*, dinner) to minimize its effects on IRT evaluation. They were also instructed to arrive at CTE for each nutritional intervention condition following a 12-hour OVF<sup>27</sup>.

The para-athletes rested in pants or shorts (female athletes also wearing sports bras) for a 10-minute acclimatization period<sup>16</sup>. The pre-meal  $T_{SKIN}$  ( $T_{PRE}$ ) was recorded immediately following a 10-minute acclimatization period. Participants then received a standardized meal, tailored to the experimental condition (detailed below), with 15 minutes allotted for consumption. The total postprandial period lasted two hours<sup>13,28</sup>. During this time, they remained at rest while IRT images were taken at 0 (immediately after), 10-, 20-, 30-, 60-, 90-, and 120-min post-meal ( $T_{POS}$ ).

At the start of the experiment, para-athletes completed the visual analog scales (VAS) for muscle pain, perceived recovery status (PRS), and well-being parameters (Hooper's scale). Metabolic parameters measured included capillary blood glucose and creatine kinase (CK). CK was assessed in a fasting state upon arrival at the CTE before acclimatization. Blood glucose was also measured in a fasting state before acclimatization and at 60- and 120-min post-meal.

### **Nutritional interventions**

During nutritional interventions, para-athletes received isocaloric meals with varying macronutrient compositions in three of the four conditions (except for OVF). The caloric content of each meal was tailored to the individual ( $5.6 \text{ kcal.kg}^{-1}$ ), based on recommendations for pre-training meals<sup>29</sup> and body mass variations among athletes (*e.g.*, para-powerlifters with

short stature and lower body mass). Each meal contained 80% of its calories from the target macronutrient, with the remaining 20% equally divided between the other two macronutrients (e.g., the carbohydrate-rich meal contained 80% of its calories from carbohydrates, 10% from protein, and 10% from fat)<sup>30,31</sup>. The caloric and nutritional details of each meal are provided in Table 1. Para-athletes had 15 minutes to consume each meal, and then measurements were taken while resting for 2 hours. In OVF condition, volunteers fasted for a total of 14 hours.

Dietary intake from the previous day was assessed via a 24-hour recall upon arrival at the CTE. The para-athletes were instructed to maintain their regular diet for 6 weeks and fasted for 12 hours before the intervention. The diet on the previous day adhered to general macronutrient guidelines for para-athletes' nutrition, with carbohydrates contributing 45% to 65% of total daily calories, proteins 10% to 35%, and fats 20% to 35%<sup>32</sup>.

### **Infrared thermography**

$T_{\text{SKIN}}$  was measured using an IRT camera E8-xT (Teledyne FLIR LLC, Wilsonville, OR, USA), with a resolution of 320 x 240 (76800 pixels), thermal sensitivity of 50 mK, temperature range of -20°C to 550°C, spectral range of 7.5 to 13 $\mu\text{m}$ , and accuracy of  $\pm 2^\circ\text{C}$  or  $\pm 2\%$ . The camera was powered 20 minutes before measurements to ensure calibration stability. All thermal images were captured in an air-conditioned environment with a  $T_{\text{AMB}}$  of approximately  $25.44 \pm 0.58^\circ\text{C}$  and relative humidity (RH) of  $63.68 \pm 7.60\%$ , with a skin emissivity index of 0.98. The camera was positioned 1.10 m from the volunteers<sup>23</sup>. Black fabric was used to prevent radiation from other sources in the experimental room. Thermal images were selected and analyzed using the software APOLLO® (APOLLO®, v. 1.0, OMNI, Brazil).

Para-athletes were instructed to avoid alcohol, smoking, caffeine, ointments, cosmetics, and bathing for four hours before the evaluation. They were also advised to avoid sunlight (e.g., direct sunlight without protection) before assessment. For more details about the time of taking IRT images, see the section 'Experimental design'.

For IRT measurements, body segments relevant to each sport were selected, specifically the upper limbs for para-athletics throwers<sup>33</sup> and para-powerlifters<sup>34</sup>. The regions of interest (ROIs) were determined based on sport-related skeletal muscle (*i.e.*, specific motor tasks and training routines). This included the anterior and posterior deltoids, pectorals, and the anterior and posterior arm muscles. Each ROI was assessed bilaterally (dominant and non-dominant sides)<sup>6,35</sup>, and the mean  $T_{\text{SKIN}}$  of each ROI was selected for analysis. As a result, two IRT images were made at each time point, encompassing 10 ROIs. Considering the number of ROIs (10) and time-points (8) in each experimental session, 80 thermal images per experimental session for each para-athlete were generated, resulting in 3,200 images across all sessions.

#### **Perceived recovery status, well-being parameters, and Visual Analog Scale for pain**

PRS was assessed before each session using a 10-point scale, where '1' indicated poor recovery/extreme fatigue and '10' indicated full recovery/energy<sup>36</sup>. A validated questionnaire collected self-reported well-being parameters, including sleep quality (Sleep), Stress, Fatigue, and muscle soreness (MS). Each parameter was scored on a 7-point scale from "1" (very good) to "7" (very poor). The Hooper-Index (HI) was computed by summing the four parameters<sup>37</sup>. The VAS is a continuous scale anchored by two verbal descriptors at each end: 'no pain' (score of 0) and 'worst imaginable pain' (score of 10)<sup>38</sup>. This scale was used to quantify the perception of muscle soreness (muscle pain VAS).

#### **Capillary blood glucose and creatine kinase measurements**

Capillary blood samples (~80  $\mu\text{L}$ ) were collected from the earlobe using a disposable lancet after antiseptic preparation with 70% ethanol. For glycemia, blood samples were immediately applied to a glucose reagent strip and measured using the Accutrend® Plus system (Roche)<sup>39</sup>. CK levels were measured using the Simplex ECO POC equipment (ECO®)<sup>40</sup>. The evaluator was blinded to the para-athletes' identity corresponding to each sample.

#### **Athletes' disabilities**

In para-sports, athletes are categorized based on the degree of activity limitation resulting from their impairments<sup>26</sup>. For this study, athletes were grouped according to their functional classification. One athlete had a visual impairment. Nine athletes, with spinal cord injury (at or below the third thoracic vertebra), cerebral palsy, and achondroplasia, were classified with physical disabilities. Although one of these athletes also had intellectual impairment, he was included in the physical disability group due to his classification for throwing events in athletics. Because this athlete presented intellectual impairment, he did not respond to the psychometric assessments.

### **Medications**

Medications were grouped based on their common pharmacological actions and therapeutic effects, as described in standard pharmacology and clinical practice texts<sup>41,42</sup>. Psychotropic drugs, including antidepressants, anxiolytics, central nervous system stimulants, sedatives/hypnotics, and antiepileptics, were grouped due to their effects on neurotransmitters and modulation of brain activity. Muscle-related drugs, such as muscle relaxants and antimuscarinics, were grouped due to their influence on muscle tone and spasticity<sup>41</sup>. Contraceptives were kept as a separate category due to their specific hormonal effects<sup>42</sup>. This grouping allowed for a more robust and simplified data analysis while maintaining clinical relevance.

### **Statistical Analysis**

To examine how different macronutrients acutely affect  $T_{SKIN}$  over time, we developed mixed linear regression models using the mean  $T_{SKIN}$  values as the dependent variable. Outliers were identified using the interquartile range method and adjusted by winsorizing values outside the range<sup>43</sup>. This method allowed a more subtle approach to outlier exclusion, selecting only extreme values without excessively altering the dataset (data not shown). The independent variables included nutritional interventions (OVF (as control), CHO, PTN, FAT), and  $T_{POS}$ . We

also included both the biological and environmental factors as independent variables. The biological factors included in the model were age, biological sex, athletes' disabilities (physical or visual),  $T_{PRE}$  and measurement regions (dominant and non-dominant sides of the pectoral, anterior and posterior deltoid, and anterior and posterior arm). The environmental factors included in the model were medications (psychotropic, muscle-related, and contraceptive), the period of the day (morning or afternoon),  $T_{AMB}$  (measured at each time point), and RH (recorded once at the start of every visit). Given the crossover design, the order of data collection (first, second, third, and fourth) was also considered an independent variable. We tested interactions between nutritional interventions and time, age, biological sex, period of the day, order of data collection, athletes' disabilities, measurement regions, and time and medications.

To minimize possible influences of the order in which variables were added to the model, we adopted the following approach: first, we added the main variables such as nutritional interventions, time, age, biological sex, and medications. Then, control variables, such as period of the day, order of data collection, disabilities, measurement regions,  $T_{AMB}$ , RH, and  $T_{PRE}$ , were added.

Our initial approach was to create a simple model, gradually expanding to a comprehensive model that included all potential fixed effects. Then, we introduced plausible random effects to further refine the model. Specifically, we considered two random effects: variations in the intercept among participants ( $1 \mid \text{participants}$ ) and variations in the slope among participants (nutritional intervention  $\mid \text{participants}$ ). We also tested a model with variations in both the intercept and the slope among participants ( $1 + \text{nutritional intervention} \mid \text{participants}$ ). To evaluate the necessity of random effects, we compared these models with a model without random effects, assessing their fit using the Akaike Information Criterion (AIC) and Analysis of Variance (ANOVA). We preferred models with lower AIC values, and a p-value  $< 0.05$  in ANOVA indicated a superior model fit<sup>44</sup>.

The AIC and ANOVA values were the same for the model with random effects on the slope and for the model with random effects on both the intercept and the slope. Thus, following the principle of parsimony<sup>44</sup>, we adopted the random effects model that included the variation only in the slope among participants. We then refined our analysis of the fixed effects, selecting the best-adjusted model based on AIC and ANOVA comparisons. Additionally, we verified that our model met the necessary assumptions (*e.g.*, normality of residuals, and independence of observations within groups) for applying mixed linear regression. This method has already been employed in a previous study carried out in our laboratory<sup>9</sup>.

One-way ANOVA and two-way ANOVA were used for the CK and blood glucose analysis, respectively. Bonferroni's post hoc tests were performed for pairwise comparisons. The normality of the data was assessed using the Shapiro-Wilk test. For normally distributed data, one-way ANOVA was used to analyze the variables Sleep, Stress, Fatigue, MS, HI, PRS, and VAS. In cases where the data violated the assumption of normality, the Friedman test was applied as a non-parametric alternative. Effect sizes (EF) were calculated using eta squared ( $\eta^2$ ) for the ANOVA tests and Kendall's *W* for the Friedman test, providing a measure of the magnitude of the intervention effect. According to the classification for  $\eta^2$ , values between 0.01 and 0.06 are considered small, between 0.06 and 0.14 are considered moderate, and values greater than 0.14 are considered large<sup>45</sup>. For Kendall's *W*, values between 0.1 and 0.3 are considered small, between 0.3 and 0.5 are considered moderate, and values greater than 0.5 are considered large<sup>46</sup>.

The figures were created in the GraphPad Prism software (version 8.0.1, San Diego, California, USA), and statistical analyses were performed in the software SPSS (version 21.0, ©Copyright IBM Corporation 1989, 2012) and R (version 4.2.2) with the RStudio interface (version 2023.06.0 +421). The following packages were used in the R software: *pacman*, *readxl*, *dplyr*, *car*, *rstatix*, and *nlme*.

## RESULTS

### Sample characteristics

Eight male and two female para-athletes participated in the study (age:  $30.5 \pm 10.5$  years, body mass:  $69.9 \pm 16.9$  kg, height:  $166.0 \pm 15.1$  cm (measured traditionally for ambulatory para-athletes and as recumbent height for wheelchair users), body mass index:  $25.49 \pm 5.76$ ). The anthropometric data, including the sum of 7 skinfolds<sup>47</sup>, as well as impairment type and functional classification<sup>26</sup>, are detailed in Table 2.

### Carbohydrate-rich meals increase blood glucose levels

As expected, two-way ANOVA analysis revealed that athletes' glycemia in the CHO condition increased at 60 min compared with pre-acclimatization values ( $p < 0.001$ ;  $\eta^2 = 0.306$ ; ES: large) and was higher than in the other conditions ( $p < 0.001$ ;  $\eta^2 = 0.293$ , ES: large) (Figure 2). There were no changes in glycemia between 60 and 120 minutes in the CHO condition. Glycemia was unaffected in FAT, PTN and OVF conditions.

### Markers of muscle damage and pain, and perceived well-being and recovery status are similar among dietary conditions

The results indicated no statistically significant differences at the pre-meal period among dietary conditions for the marker of muscle damage CK ( $p = 0.965$ ,  $\eta^2 = 0.0074$ , ES: small) and muscle pain VAS ( $p = 0.161$ ,  $W = 0.191$ , ES: small) (Figure 3 A-B). Perceived well-being, *i.e.*, Sleep ( $p = 0.731$ ,  $\eta^2 = 0.065$ , ES: moderate), Stress ( $p = 0.881$ ,  $W = 0.0247$ , ES: small), Fatigue ( $p = 0.947$ ,  $W = 0.00136$ , ES: small), MS ( $p = 0.942$ ,  $W = 0.014$ , ES: small), and HI ( $p = 0.979$ ,  $\eta^2 = 0.0047$ , ES: small), and recovery status, *i.e.*, PRS ( $p = 0.956$ ,  $\eta^2 = 0.0098$ , ES: small) (Figure 4 A-F) were also similar among dietary conditions.

### Carbohydrate and protein-rich meals and other biological and environmental factors influence skin temperature

Table 3 shows that our mixed linear regression model identified the intercept ( $b = 14.041$ ,  $t = 17.424$ ,  $p < 0.001$ ) as significant, estimating a baseline  $T_{SKIN}$  of  $14.041^{\circ}\text{C}$  derived from the regression equation when all predictors were set to zero.  $T_{SKIN}$  decreases by  $0.002$  and  $0.037^{\circ}\text{C}$ , respectively, when the time (min) and age (years old) increase by one unit. Among the categorical variables, males exhibited values  $0.293^{\circ}\text{C}$  higher than females, highlighting the influence of biological sex. Similarly, para-athletes using muscle-related medications and contraceptives recorded higher temperatures ( $0.849^{\circ}\text{C}$  and  $0.576^{\circ}\text{C}$ , respectively) compared with those not taking any medication (Table 3).

$T_{SKIN}$  was also significantly affected in different body regions (Table 3). The dominant anterior arm exhibited higher values ( $0.234^{\circ}\text{C}$ ) compared to the non-dominant anterior arm, which served as the control region. Similarly, the dominant anterior deltoid ( $0.183^{\circ}\text{C}$ ), dominant pectoral ( $0.191^{\circ}\text{C}$ ), and non-dominant pectoral ( $0.214^{\circ}\text{C}$ ) recorded higher temperatures than the control. In contrast, lower  $T_{SKIN}$  was observed in the dominant ( $-0.775^{\circ}\text{C}$ ) and non-dominant ( $-0.817^{\circ}\text{C}$ ) posterior arms and the dominant ( $-0.173^{\circ}\text{C}$ ) and non-dominant ( $-0.199^{\circ}\text{C}$ ) posterior deltoids compared to the non-dominant anterior arm. These findings suggest that anterior regions generally have higher  $T_{SKIN}$  than posterior regions.

As for environmental variables (Table 4),  $T_{SKIN}$  increases by  $0.184$ ,  $0.015$ , and  $0.418^{\circ}\text{C}$ , respectively, when the  $T_{AMB}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), RH (%), and  $T_{PRE}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) increase by one unit (Table 4).  $T_{SKIN}$  measured in the afternoon increases  $1.10^{\circ}\text{C}$  compared with the values obtained in the morning.

For the interactions, the influence of time on  $T_{SKIN}$  was modulated by several factors (Table 4). Notably, there were significant interactions between meal composition and time. The interaction between CHO or PTN and time indicated that the influence of time on  $T_{SKIN}$  increases by  $0.004^{\circ}\text{C}$  and  $0.003^{\circ}\text{C}$  with higher carbohydrate and protein intake, respectively, compared with OVF. Figures 5 and 6 demonstrate these CHO and PTN effects inducing a sustained elevation in  $T_{SKIN}$  over time compared with OVF. There was also significant

interaction between PTN and data collected in the afternoon in  $T_{SKIN}$ , indicating that PTN intake in the afternoon ( $0.357\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) has a more pronounced effect on  $T_{SKIN}$  than in the morning. There was significant interaction between FAT and physical impairment indicating that FAT intake leads to an increase of  $0.198\text{ }^{\circ}\text{C}$  in  $T_{SKIN}$  compared with fasting, specifically in para-athletes with physical impairments compared to visual ones.

In contrast, several interactions were found to decrease  $T_{SKIN}$  (Table 4). The interaction between age and FAT suggests that the effect of age on  $T_{SKIN}$  decreases ( $0.006\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) with higher FAT intake compared to OVF. There was a significant interaction between PTN and physical impairment indicating that PTN intake leads to a decrease of  $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$  in  $T_{SKIN}$  compared with fasting, especially in para-athletes with physical impairments compared to visual ones. Moreover, the interactions between FAT and specific body regions showed decreases in  $T_{SKIN}$  in the dominant anterior arm ( $0.164\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and the non-dominant anterior deltoid ( $0.184\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) compared with the non-dominant anterior arm, indicating localized effects of FAT intake on  $T_{SKIN}$ . No effect was observed on the other body regions investigated. Finally, significant interactions between time and medications indicate that psychotropic ( $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and muscle-related medications ( $-0.004\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) decrease  $T_{SKIN}$  over time compared with para-athletes not taking any medication.

As for the variables psychotropic medications, non-dominant anterior deltoid, and the interactions between age and PTN, order of data collection and CHO, dominant anterior deltoid and PTN, and non-dominant pectoral and FAT, these factors were included in the model due to their lower AIC values but were not statistically significant ( $p > 0.05$ ).

## **DISCUSSION**

In this preliminary study, we were the first to investigate the thermogenic effects of different macronutrients on IRT in para-athletes. Our findings demonstrate that  $T_{SKIN}$  is significantly increased by CHO and PTN in body regions corresponding to the muscles involved in the

specific motor actions of para-athletics and para-powerlifting. In addition to dietary factors, our data also show that  $T_{\text{SKIN}}$  is significantly affected by a range of biological and environmental variables, including time, age, biological sex, medication use,  $T_{\text{AMB}}$ ,  $T_{\text{PRE}}$ , RH, body regions, and period of the day.

Firstly, considering that muscle injuries<sup>48</sup> or intense physical training<sup>49</sup> before the experimental visits could affect  $T_{\text{SKIN}}$ , tecidual damage and recovery parameters were monitored to control potential confounding factors for  $T_{\text{SKIN}}$ . It is well known that physical exercise sessions can influence the muscle inflammatory response<sup>50</sup>, accompanied by delayed-onset muscle soreness<sup>51</sup>. The assessment of recovery status should include objective physiological parameters (such as inflammatory or muscle damage markers)<sup>49</sup> and psychometric parameters (such as PRS)<sup>36,51</sup>. In this study, we evaluated both subjective tools (*i.e.*, PRS and well-being parameters), and objective tools (*i.e.*, CK). Both the well-being scale proposed by Hooper *et al.* (1995)<sup>37</sup> and the PRS scale proposed by Laurent *et al.* (2011)<sup>36</sup> have proven effective in detecting changes in sleep quality, stress, fatigue, muscle soreness<sup>52</sup>, and recovery<sup>53</sup> in para-athletes with and without disabilities. In our study, Sleep, Stress, Fatigue, MS, HI, and PRS did not show significant differences in any condition, indicating that the para-athletes were evaluated at a similar recovery and well-being status in all experimental visits. Muscle injuries induced by intense physical training have been associated with increases in capillary CK levels, an objective marker of muscle damage<sup>40</sup>. Capillary CK was unaltered before any dietary condition, suggesting no significant change in the para-athletes' muscle damage before starting the IRT measurements.

The first analysis of our mixed linear regression revealed expected yet novel findings of the practical relevance of diet-related effects of IRT protocols to sports and healthcare.  $T_{\text{SKIN}}$  was significantly reduced during the 2-hour analysis period ( $T_{\text{POS}}$ ). Schlögl *et al.* (2015) evaluated the effect of fasting (*i.e.*, in the absence of the thermic effect of food) on volunteers exposed to

a 24-hour whole-room indirect calorimeter and observed a reduction in caloric expenditure<sup>54</sup>, possibly explained by decreased metabolic activity and reduced heat exchange<sup>55</sup>. Interestingly, when analyzing the interaction between CHO and PTN – but not FAT – over time, an increase in  $T_{SKIN}$  was observed compared to OVF. This result may also be attributed to DIT, given that PTN and CHO are macronutrients with a higher thermogenesis contribution<sup>20</sup>. Supporting these findings, Habek *et al.* (2018) demonstrated that the supraclavicular region, known for containing brown adipose tissue, shows an increase in  $T_{SKIN}$  in response to a complete meal containing all macronutrients<sup>13</sup>. Similarly, Jalil *et al.* (2019) investigated the peripheral thermal response of lean and obese females after the ingestion of a carbohydrate bolus, finding that the thermal response was influenced not only by the presence of glucose but also by the participants' body mass index<sup>28</sup>. Notably, the thermic effect of CHO was greater than that of PTN, suggesting that additional factors or mechanisms may contribute to these observed results.

Both carbohydrates and proteins stimulate insulin release to some extent<sup>56</sup>, suggesting that the observed thermogenic effects may also involve insulin-mediated mechanisms. Supporting this idea, capillary glycemia was measured as a metabolic control parameter related to the different macronutrient intakes. As expected, glycemia significantly increased 60 minutes after the CHO compared to baseline and the other conditions (*i.e.*, FAT, PTN, and fasting). In contrast, FAT, PTN, and fasting did not affect glycemia. The thermogenic role of insulin is not yet fully understood. Winn *et al.* (2024) suggest that insulin plays a key role in redistributing energy substrates and increasing energy expenditure, as evaluated by indirect calorimetry<sup>57</sup>. However, further studies are needed to clarify how insulin mediates this process. Therefore, CHO and PTN, but not FAT, affect  $T_{SKIN}$  over time, likely due to their contributions to DIT and potentially through insulin-mediated thermogenesis.

Among the biological factors, we found that age is another time-dependent factor reducing  $T_{SKIN}$ . This finding aligns with well-documented effects of aging, such as the decline in muscle

mass<sup>58</sup>, and consequently, metabolic activity<sup>18</sup>. Aging is also associated with diminished  $\beta$ -adrenergically mediated thermogenesis<sup>59</sup>. Kerckhoffs *et al.* (1998) demonstrated that aging reduces  $\beta$ -adrenergic receptor-mediated thermogenesis, which plays a key role in regulating energy expenditure and fat metabolism. Older male showed an attenuated thermogenic and cardiac response, even when exposed to higher doses of  $\beta$ -adrenergic agonist. Despite elevated basal levels of norepinephrine and epinephrine, their  $\beta$ -adrenergic sensitivity was impaired<sup>59</sup>. As individuals age, the diminished metabolic response<sup>18</sup> may also contribute to a reduction in basal heat production from muscle tissues.

Our study further explored the interaction between macronutrient intake and age, revealing that FAT amplified the effects of aging by further reducing the  $T_{SKIN}$  response. Emerson *et al.* (2018) found that the postprandial response of sedentary older adults to a fat-rich meal was worsened, showing higher glycemic and lipidemic responses compared to younger individuals or physically active older adults<sup>18</sup>. This suggests that older participants may have experienced slower metabolic and digestive responses to FAT, leading to delayed heat production. Interestingly, the thermic effect of food has also been evaluated in non-human models using IRT. In a study on birds, those that received a high-energy diet supplemented with oil exhibited a lower average surface temperature compared to those on a control diet. Although interspecies particularities exist, this difference suggests that the high-energy, fat-rich diet reduced metabolic heat production, resulting in lower heat loss through the body surface<sup>60</sup>. This interaction highlights the sensitivity of IRT in visualizing localized metabolic and thermoregulatory responses to diet, such as fat intake, in contrast with tools like indirect calorimetry, since the thermic effect of fat minimally contributes to DIT<sup>61</sup>. Furthermore, IRT captures localized heat production responses, whereas indirect calorimetry measures only systemic heat production.

Biological sex may also be an important factor affecting  $T_{SKIN}$ . Males typically have greater muscle mass and lower body fat than females<sup>8</sup>, which enhances heat production and facilitates more efficient heat transfer from skeletal muscles and internal tissues to the skin. In fact, our findings revealed that males demonstrated higher  $T_{SKIN}$  values compared to females. Supporting our findings, Xu *et al.* (2024) evaluated  $T_{SKIN}$  and body core temperature ( $T_{CORE}$ ) in male and female volunteers under different stable and transient (*i.e.*, different  $T_{AMB}$  and RH) environmental conditions. Their study found that  $T_{CORE}$  showed no significant differences across conditions in the stable experiment, whereas  $T_{SKIN}$  varied significantly with changes in  $T_{AMB}$  during both stable and transient experiments. Notably, when  $T_{AMB}$  dropped below 28°C, females exhibited lower  $T_{SKIN}$  than males<sup>62</sup>. This sex-dimorphic response may also be explained by hormonal influences, such as the thermogenic effects of testosterone and growth hormone in increasing energy expenditure<sup>63</sup>. Despite the metabolic effects of hormones on macronutrient metabolism<sup>63</sup>, no interaction between meals and biological sex was found.

Moreover, significant variations in  $T_{SKIN}$  across different body regions were observed, with anterior regions, such as the deltoids and pectorals, displaying higher temperatures compared to posterior regions. Studies conducted on both human<sup>64</sup> and animal models<sup>65</sup> support our findings, demonstrating that  $T_{SKIN}$  and  $T_{CORE}$  are not homogeneous and vary depending on the region assessed. The difference in our study is likely attributed to the greater muscle mass and metabolic activity in anterior regions, such as the pectorals, which are actively engaged in the specific motor tasks required by the athletes' sports<sup>66</sup> and the training volume involved<sup>67</sup>. Resende *et al.* (2021) evaluated the effect of three preparatory activity protocols in para-powerlifting athletes, focusing on sport-related skeletal muscles in anterior regions (deltoid and pectoral) and posterior regions (triceps). Notably, only the anterior pectoral region responded to the preparatory protocols, likely due to increased motor unit recruitment during traditional warm-ups<sup>66</sup>. Additionally, the interaction between body region and FAT was particularly

noteworthy. Regions such as anterior dominant arm and anterior non-dominant deltoid showed a distinct reduction of thermal response following the intake of FAT, suggesting that dietary fat may affect localized thermogenic effects.

Disabilities could influence meal metabolism and para-athletes' thermogenic responses. This study found that PTN and FAT affect  $T_{SKIN}$  differently depending on the type of disability. PTN reduced  $T_{SKIN}$  in para-athletes with physical disabilities compared to those with visual impairments, while FAT increased  $T_{SKIN}$  in athletes with physical disabilities compared to those with visual disabilities. Both cerebral palsy and spinal cord injury significantly affect gastrointestinal function, though through different mechanisms. In cerebral palsy, neurological damage impairs motor and sensory control, leading to difficulties such as dysphagia, gastroesophageal reflux, and constipation, due to motor incoordination and compromised nerve pathways involved in digestive reflexes<sup>68</sup>. In contrast, spinal cord injuries disrupt the autonomic pathways responsible for motor and secretory reflexes in the gastrointestinal tract, which can result in gastroparesis and neurogenic bowel, characterized by constipation and severe colonic dysfunction. Additionally, the use of anticholinergics to control bladder overactivity can have the side effect of reducing gastrointestinal motility<sup>69</sup>. On the other hand, achondroplasia typically does not present specific gastrointestinal impairments, but the obesity commonly associated with this condition may affect certain phases of digestion<sup>70</sup>.

Surprisingly, protein – but no fat – intake resulted in a reduction in  $T_{SKIN}$ . Fat takes longer to digest due to emulsification, slower gastric emptying, and complex lymphatic transport<sup>71</sup>. Although proteins contribute significantly to DIT due to the exhaustive process of breaking peptide bonds<sup>17</sup>, they behave differently in isocaloric meals. Since fat has a higher caloric density (9 kcal.g<sup>-1</sup> compared to 4 kcal.g<sup>-1</sup> for protein), a smaller amount is needed to achieve the same calorie content, allowing for faster digestion and a rapid release of metabolic heat, increasing  $T_{SKIN}$ . In contrast, protein digestion is slower, requiring stomach hydrolysis and

intestinal enzymatic action, and when the absolute protein intake exceeds fat, this process further slows, gradually increasing metabolic heat<sup>19</sup>.

Another biological factor evaluated in the present study was  $T_{PRE}$ , to understand how pre-meal  $T_{SKIN}$  would impact the para-athletes' metabolic response throughout the study. One of the most important aspects of the IRT measurement protocol is the acclimatization period. This initial phase aims to calm the volunteer and introduce them to a controlled environment, thereby ensuring the stability of blood pressure and  $T_{SKIN}$ <sup>16</sup>. The 10-minute acclimatization period implemented in this study aligns with established guidelines<sup>1</sup> and findings from previous literature. Bouzas-Marins *et al.* (2014b) evaluated different acclimatization durations in IRT, demonstrating that 10 minutes is sufficient to stabilize volunteers'  $T_{SKIN}$ <sup>16</sup>. However, these findings were obtained by individuals without disabilities, whose thermoregulatory mechanisms are preserved. The literature on studies involving people with disabilities and their IRT response remains limited<sup>72</sup>. Therefore, the acclimatization time adopted in the present study may have been insufficient to ensure adequate adaptation for these para-athletes, regardless of the  $T_{AMB}$  used<sup>1</sup>. This limitation is evidenced by the influence of  $T_{PRE}$  on  $T_{SKIN}$ . Thus, there is a need to define specific protocols that account for the thermoregulatory particularities of para-athletes.

This study also highlighted the influence of medications on  $T_{SKIN}$ , with different patterns emerging over time. Female para-athletes using contraceptives containing progesterone exhibited higher  $T_{SKIN}$  compared to non-users, possibly due to the vasodilatory effect of progesterone. While progesterone is associated with increased  $T_{CORE}$  during the luteal phase of the menstrual cycle<sup>73</sup>, its role in peripheral vasodilation remains unclear<sup>74</sup>, with studies reporting divergent findings. Oral contraceptives, by inhibiting ovulation and stabilizing hormonal fluctuations, are used not only for birth control but also to manage menstrual discomfort and align menstrual cycles with athletic events, potentially stabilizing

performance<sup>75</sup>. Furthermore, other medications, such as muscle-related and psychotropic drugs, are commonly used by para-athletes due to pre-existing disabilities<sup>76</sup>, and can affect  $T_{SKIN}$ . Muscle-related medications initially increased  $T_{SKIN}$ , but their effect gradually diminished over time, as shown by the interaction between medication use and time. Psychotropic drugs also exhibited a  $T_{SKIN}$ -reducing effect over time, likely due to reduced sympathetic activity and modulation of neurotransmitters, such as GABA and serotonin<sup>77</sup>, leading to lower thermogenesis and heat dissipation through the skin. These findings reflect the complexity of the interplay between thermoregulation, medication use, and environmental factors, emphasizing the need for more detailed and individualized approaches in the thermographic evaluation of para-athletes.

Another key environmental factor influencing  $T_{SKIN}$  was the period of the day, with higher temperatures recorded in the afternoon compared to the morning. The central circadian clock in humans regulates diurnal fluctuations in temperature thresholds that govern autonomic thermoregulatory responses, influencing both  $T_{CORE}$ <sup>78</sup> and  $T_{SKIN}$ <sup>79</sup>. Consistent with our findings, Costa *et al.* (2018) observed circadian variation in  $T_{SKIN}$ , as measured by IRT, in lean females throughout the day. All 24 ROIs analyzed showed their highest value in the afternoon, specifically at 3 p.m.<sup>80</sup>, the same time investigated in our study. Moreover, PTN exhibited a significant interaction with the period of the day, suggesting that protein intake may enhance the thermogenic effects observed in the afternoon compared to fasting. Some evidence indicates that enzymes and hormones related to digestion and protein metabolism, such as gastrin and secretin, follow circadian rhythmicity<sup>81</sup>, which may explain the cumulative thermic effect of PTN during the period of the day. Ribeiro *et al.* (1998) investigated how circadian phase shifts affect postprandial hormonal and metabolic responses in a simulated shift work environment. A 9-hour delay in the normal shift disrupted metabolic responses to a high-caloric meal, leading to an increase in triglycerides and a reduction in non-esterified fatty acids<sup>82</sup>.

Finally, external environmental factors, including  $T_{AMB}$  and RH – which are well-documented in the literature as critical influences on  $T_{SKIN}^1$  – showed a significant impact on  $T_{SKIN}$  in the present study. In warm environments, peripheral vasodilation occurs, facilitating heat dissipation from the body to the external environment. When  $T_{AMB}$  exceeds  $T_{SKIN}$ , heat transfers from the environment to the skin and elevates its temperature. In prolonged conditions, the autonomic nervous system is activated to stimulate sweating, promoting heat loss through evaporation. However, in environments with high RH, the efficiency of this evaporative process is compromised, making heat dissipation more challenging<sup>83</sup>. Consequently, the simultaneous increase in RH and  $T_{AMB}$  leads to physiological elevations in  $T_{SKIN}$ , resulting in greater heat radiation that can be accurately captured by IRT<sup>16</sup>.

## CONCLUSION

This study provides the first evidence of the critical impact of macronutrient intake on the  $T_{SKIN}$  of para-athletes. Our results demonstrate that CHO and PTN significantly elevate  $T_{SKIN}$  in regions corresponding to muscles involved in sports modalities, highlighting the need to consider meal composition immediately prior to IRT assessments. Additionally, FAT reduced  $T_{SKIN}$  in specific regions, with variations depending on the type of disability.

Furthermore, we identified biological factors, such as age, type of disability, and  $T_{PRE}$ , as well as environmental factors, such as period of the day,  $T_{AMB}$ , and RH, modulate thermographic responses, emphasizing the need for personalized and rigorous approaches in future studies.

These findings expand the application of IRT, demonstrating its sensitivity in capturing thermoregulatory and metabolic responses to acute dietary interventions. Thus, the importance of standardizing and documenting pre-IRT food intake is reinforced, both to ensure greater reproducibility in research and to enhance the effectiveness of clinical assessments.

## DECLARATION OF CONFLICT OF INTEREST

We confirm that there are no potential conflicts of interest.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the support given by Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, Pro-Reitoria de Pesquisa - Federal University of Minas Gerais, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (N. 444769/2023-4, N. 405140/2021-5 and N. 442645/2018-0), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Secretaria Nacional de Alto Rendimento do Ministério do Esporte (Governo Federal, Brazil - N. 58000.008978/2018-37 and N.71000.056251/2020-49), Comitê Paralímpico Brasileiro, Centro de Treinamento Esportivo e Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão. We thank Prof. Dr. Rafael Longhi Sampaio de Barros from the Department of Nutrition at the Escola de Enfermagem, UFMG, for the initial discussions regarding the meal model. We also extend our gratitude to Prof. Aloisio Joaquim Freitas Ribeiro from the Department of Statistics at the Institute of Exact Sciences, UFMG, for his contributions to the statistical discussions of the project.

## REFERENCES

1. Moreira DG, Costello JT, Brito CJ, et al. Thermographic imaging in sports and exercise medicine: A Delphi study and consensus statement on the measurement of human skin temperature. *J Therm Biol.* 2017;69:155-162. doi:10.1016/j.jtherbio.2017.07.006
2. Kesztyüs D, Brucher S, Wilson C, Kesztyüs T. Use of Infrared Thermography in Medical Diagnosis, Screening, and Disease Monitoring: A Scoping Review. *Medicina (B Aires).* 2023;59(12):2139. doi:10.3390/medicina59122139
3. Ramirez-GarciaLuna JL, Bartlett R, Arriaga-Caballero JE, Fraser RDJ, Saiko G. Infrared Thermography in Wound Care, Surgery, and Sports Medicine: A Review. *Front Physiol.* 2022;13. doi:10.3389/fphys.2022.838528
4. De León-Muñoz A, Priego-Quesada JI, Marzano-Felisatti JM, Sanchez-Jimenez JL, Sendra-Pérez C, Aparicio-Aparicio I. Preliminary Application of Infrared Thermography to Monitoring of Skin Temperature Asymmetries in Professional Padel Players. *Sensors.* 2024;24(14):4534. doi:10.3390/s24144534
5. Rojas-Valverde D, Tomás-Carús P, Timón R, et al. Short-Term Skin Temperature Responses to Endurance Exercise: A Systematic Review of Methods and Future Challenges in the Use of Infrared Thermography. *Life.* 2021;11(12):1286. doi:10.3390/life11121286
6. Côte AC, Pedrinelli A, Marttos A, Souza IFG, Grava J, José Hernandez A. Infrared thermography study as a complementary method of screening and prevention of muscle injuries: pilot study. *BMJ Open Sport Exerc Med.* 2019;5(1):e000431. doi:10.1136/bmjsem-2018-000431

7. Gomez Carmona PM. *Influencia de La Información Termográfica Infrarroja En El Protocolo de Prevención de Lesiones de Un Equipo de Fútbol Profesional Español*. Universidad Politécnica de Madrid; 2012. doi:10.20868/UPM.thesis.14694
8. Marins JCB, Fernandes AA, Cano SP, et al. Thermal body patterns for healthy Brazilian adults (male and female). *J Therm Biol*. 2014;42:1-8. doi:10.1016/j.jtherbio.2014.02.020
9. Andrade MT, Nunes-Leite MMS, Bruzzi RS, et al. Predicting the body core temperature of recreational athletes at the end of a 10 km self-paced run under environmental heat stress. *Exp Physiol*. 2023;108(6):852-864. doi:10.1113/EP091017
10. Reis HHT, Brito CJ, Sillero-Quintana M, et al. Can the body mass index influence the skin temperature of adolescents assessed by infrared thermography? *J Therm Biol*. 2023;111. doi:10.1016/j.jtherbio.2022.103424
11. Mazdeyasna S, Ghassemi P, Wang Q. Best Practices for Body Temperature Measurement with Infrared Thermography: External Factors Affecting Accuracy. *Sensors*. 2023;23(18):8011. doi:10.3390/s23188011
12. Shuran M, Nelson R. Quantitation of energy expenditure by infrared thermography. *Am J Clin Nutr*. 1991;53(6):1361-1367. doi:10.1093/ajcn/53.6.1361
13. Habek N, Kordić M, Jurenec F, Dugandžić A. Infrared thermography, a new method for detection of brown adipose tissue activity after a meal in humans. *Infrared Phys Technol*. 2018;89:271-276. doi:10.1016/j.infrared.2018.01.020
14. Dauncey MJ, Haseler C, Page Thomas DP, Parr G. Influence of a meal on skin temperatures estimated from quantitative IR-thermography. *Experientia*. 1983;39(8):860-862. doi:10.1007/BF01990405
15. Sanchez-Jimenez JL, Aparicio I, Romero-Avila JL, Bellot-Arcís C, Cibrián Ortiz de Anda RM, Priego-Quesada JI. Skin temperature measurement in individuals with spinal cord injury during and after exercise: Systematic review. *J Therm Biol*. 2022;105:103146. doi:10.1016/j.jtherbio.2021.103146
16. Marins JCB, Moreira DG, Cano SP, et al. Time required to stabilize thermographic images at rest. *Infrared Phys Technol*. 2014;65:30-35. doi:10.1016/j.infrared.2014.02.008
17. Calcagno M, Kahleova H, Alwarith J, et al. The Thermic Effect of Food: A Review. *J Am Coll Nutr*. 2019;38(6):547-551. doi:10.1080/07315724.2018.1552544
18. Emerson SR, Kurti SP, Emerson EM, et al. Postprandial Metabolic Responses Differ by Age Group and Physical Activity Level. *J Nutr Health Aging*. 2018;22(1):145-153. doi:10.1007/s12603-017-0956-6
19. Goodman BE. Insights into digestion and absorption of major nutrients in humans. *Adv Physiol Educ*. 2010;34(2):44-53. doi:10.1152/advan.00094.2009
20. Saito M, Matsushita M, Yoneshiro T, Okamatsu-Ogura Y. Brown Adipose Tissue, Diet-Induced Thermogenesis, and Thermogenic Food Ingredients: From Mice to Men. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2020;11. doi:10.3389/fendo.2020.00222
21. Haq T, Crane JD, Kanji S, et al. Optimizing the methodology for measuring supraclavicular skin temperature using infrared thermography; implications for measuring brown adipose tissue activity in humans. *Sci Rep*. 2017;7(1):11934. doi:10.1038/s41598-017-11537-x
22. Periasamy M, Herrera JL, Reis FCG. Skeletal Muscle Thermogenesis and Its Role in Whole Body Energy Metabolism. *Diabetes Metab J*. 2017;41(5):327. doi:10.4093/dmj.2017.41.5.327
23. Rojas-Valverde D, Tomás-Carús P, Timón R, et al. Short-Term Skin Temperature Responses to Endurance Exercise: A Systematic Review of Methods and Future Challenges in the Use of Infrared Thermography. *Life*. 2021;11(12):1286. doi:10.3390/life11121286
24. Pinheiro LSP, Silva A, Madaleno FO, et al. Prevalence and incidence of health problems and their characteristics in Brazilian para athletes: A one-season single-center prospective pilot study. *Disabil Health J*. 2024;17(1):101511. doi:10.1016/j.dhjo.2023.101511
25. Fagher K, Dahlström Ö, Jacobsson J, Timpka T, Lexell J. Prevalence of Sports-Related Injuries and Illnesses in Paralympic Athletes. *PM&R*. 2020;12(3):271-280. doi:10.1002/pmrj.12211
26. Tweedy SM, Vanlandewijck YC. International Paralympic Committee position stand—background and scientific principles of classification in Paralympic sport. *Br J Sports Med*. 2011;45(4):259-269. doi:10.1136/bjism.2009.065060
27. Nirengi S, Wakabayashi H, Matsushita M, et al. An optimal condition for the evaluation of human brown adipose tissue by infrared thermography. *PLoS One*. 2019;14(8):e0220574. doi:10.1371/journal.pone.0220574
28. Jalil B, Hartwig V, Moroni D, et al. A pilot study of infrared thermography based assessment of local skin temperature response in overweight and leanwomen during oral glucose tolerance test. *J Clin Med*. 2019;8(2). doi:10.3390/jcm8020260
29. Kerksick CM, Wilborn CD, Roberts MD, et al. ISSN exercise & sports nutrition review update: research & recommendations. *J Int Soc Sports Nutr*. 2018;15(1). doi:10.1186/s12970-018-0242-y
30. Rowlands DS, Hopkins WG. Effect of High-Fat, High-Carbohydrate, and High-Protein Meals on Metabolism and Performance during Endurance Cycling. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2002;12(3):318-335. doi:10.1123/ijsnem.12.3.318

31. Kotopoulea-Nikolaïdi M, Watkins E, Giannopoulou I. Effects of High Carbohydrate vs. High Protein Pre-exercise Feedings on Psychophysiological Responses to High Intensity Interval Exercise in Overweight Perimenopausal Women. *Front Nutr.* 2019;5. doi:10.3389/fnut.2018.00141
32. *Dietary Reference Intakes.* National Academies Press; 2006. doi:10.17226/11537
33. Escamilla RF, Andrews JR. Shoulder Muscle Recruitment Patterns and Related Biomechanics during Upper Extremity Sports. *Sports Medicine.* 2009;39(7):569-590. doi:10.2165/00007256-200939070-00004
34. Stastny P, Gołaś A, Blazek D, et al. A systematic review of surface electromyography analyses of the bench press movement task. *PLoS One.* 2017;12(2):e0171632. doi:10.1371/journal.pone.0171632
35. Fraga GS, Aïdar FJ, Matos DG, et al. Effects of Ibuprofen Intake in Muscle Damage, Body Temperature and Muscle Power in Paralympic Powerlifting Athletes. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(14):5157. doi:10.3390/ijerph17145157
36. Laurent CM, Green JM, Bishop PA, et al. A Practical Approach to Monitoring Recovery: Development of a Perceived Recovery Status Scale. *J Strength Cond Res.* 2011;25(3):620-628. doi:10.1519/JSC.0b013e3181c69ec6
37. Hooper SL, Mackinnon LT. Monitoring Overtraining in Athletes. *Sports Medicine.* 1995;20(5):321-327. doi:10.2165/00007256-199520050-00003
38. Hawker GA, Mian S, Kendzerska T, French M. Measures of adult pain: Visual Analog Scale for Pain (VAS Pain), Numeric Rating Scale for Pain (NRS Pain), McGill Pain Questionnaire (MPQ), Short-Form McGill Pain Questionnaire (SF-MPQ), Chronic Pain Grade Scale (CPGS), Short Form-36 Bodily Pain Scale (SF-36 BPS), and Measure of Intermittent and Constant Osteoarthritis Pain (ICOAP). *Arthritis Care Res (Hoboken).* 2011;63(S11). doi:10.1002/acr.20543
39. Ferraz DP, Maia FFR, Araújo LR. [Fingerstick capillary glycemia versus ear lobe measurement: comparative analysis of results and patient preferences]. *Arq Bras Endocrinol Metabol.* 2004;48(3):389-393. doi:10.1590/s0004-27302004000300010
40. Knoblauch MA, O'Connor DP, Clarke MSF. Capillary and venous samples of total creatine kinase are similar after eccentric exercise. *J Strength Cond Res.* 2010;24(12):3471-3475.
41. Brunton LL, Hilal-Dandan R, Knollmann BC. *As Bases Farmacológicas Da Terapêutica de Goodman e Gilman.* 13th ed. AMGH; 2018.
42. Hatcher RobertA, Trussel J, Stewart F, Nelson MD, Jr. W. *Contraceptive Technology.* Ardent Media Inc; 2017.
43. Kwak SK, Kim JH. Statistical data preparation: management of missing values and outliers. *Korean J Anesthesiol.* 2017;70(4):407. doi:10.4097/kjae.2017.70.4.407
44. Meteyard L, Davies RAI. Best practice guidance for linear mixed-effects models in psychological science. *J Mem Lang.* 2020;112:104092. doi:10.1016/j.jml.2020.104092
45. Cohen J. A power primer. *Psychol Bull.* 1992;112(1):155-159. doi:10.1037/0033-2909.112.1.155
46. TOMCZAK M, TOMCZAK E. The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. *Trends Sport Sci.* 2014;1(21):19-25.
47. Jackson AS, Pollock ML. Generalized equations for predicting body density of men. *Br J Nutr.* 1978;40(3):497-504. doi:10.1079/bjn19780152
48. Bandeira F, Neves EB, Moura MAM de, Nohama P. A termografia no apoio ao diagnostico de lesao muscular no esporte. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte.* 2014;20(1):59-64. doi:10.1590/S1517-86922014000100012
49. Chaves SFN, Ferreira-Júnior JB, Duarte W, et al. IGF-1, C-Reactive Protein, and Skin Temperature Responses to a Non-Contact Team Sport Activity Circuit in Under-20 Elite Soccer Players. *Brazilian Archives of Biology and Technology.* 2024;67. doi:10.1590/1678-4324-2024230071
50. Meeusen R, Duclos M, Foster C, et al. Prevention, Diagnosis, and Treatment of the Overtraining Syndrome. *Med Sci Sports Exerc.* 2013;45(1):186-205. doi:10.1249/MSS.0b013e318279a10a
51. Ferreira-Júnior JB, Chaves SFN, Pinheiro MHA, et al. Is skin temperature associated with muscle recovery status following a single bout of leg press? *Physiol Meas.* 2021;42(3):034002. doi:10.1088/1361-6579/abe9fe
52. Campos BT, Nakamura FY, Penna EM, et al. Monitoring Training Loads in Judo Athletes: Different Time Courses of Physiological, Neuromuscular, and Perceptual Responses. *Int J Exerc Sci.* 2023;16(6):638-653.
53. Ribeiro Neto F, Alsamir Tibana R, Rodrigues Dorneles J, Gomes Costa RR. Internal and External Training Workload Quantification in 4 Experienced Paracanoeing Athletes. *J Sport Rehabil.* 2022;31(2):239-245. doi:10.1123/jsr.2020-0499
54. Schlögl M, Piaggi P, Pannacciuli N, Bonfiglio SM, Krakoff J, Thearle MS. Energy Expenditure Responses to Fasting and Overfeeding Identify Phenotypes Associated With Weight Change. *Diabetes.* 2015;64(11):3680-3689. doi:10.2337/db15-0382
55. Henderson MET, Halsey LG. The metabolic upper critical temperature of the human thermoneutral zone. *J Therm Biol.* 2022;110:103380. doi:10.1016/j.jtherbio.2022.103380
56. Kolic J, Sun WG, Cen HH, et al. Proteomic predictors of individualized nutrient-specific insulin secretion in health and disease. *Cell Metab.* 2024;36(7):1619-1633.e5. doi:10.1016/j.cmet.2024.06.001

57. Winn NC, Schleh MW, Garcia JN, et al. Insulin at the intersection of thermoregulation and glucose homeostasis. *Mol Metab.* 2024;81:101901. doi:10.1016/j.molmet.2024.101901
58. Wilkinson DJ, Piasecki M, Atherton PJ. The age-related loss of skeletal muscle mass and function: Measurement and physiology of muscle fibre atrophy and muscle fibre loss in humans. *Ageing Res Rev.* 2018;47:123-132. doi:10.1016/j.arr.2018.07.005
59. Kerckhoffs DAJM, Blaak EE, Van Baak MA, Saris WHM. Effect of aging on  $\beta$ -adrenergically mediated thermogenesis in men. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism.* 1998;274(6):E1075-E1079. doi:10.1152/ajpendo.1998.274.6.E1075
60. Ferreira V, Francisco N, Belloni M, et al. Infrared thermography applied to the evaluation of metabolic heat loss of chicks fed with different energy densities. *Rev Bras Cienc Avic.* 2011;13(2):113-118. doi:10.1590/S1516-635X2011000200005
61. Ho KKY. Diet-induced thermogenesis: fake friend or foe? *Journal of Endocrinology.* 2018;238(3):R185-R191. doi:10.1530/JOE-18-0240
62. Xu X, Zhang H, Wu G, Lian Z, Xu H. Sex differences in body temperature and thermal perception under stable and transient thermal environments: A comparative study. *Science of The Total Environment.* 2024;951:175323. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.175323
63. Gibney J, Wolthers T, Johannsson G, Umpleby AM, Ho KKY. Growth hormone and testosterone interact positively to enhance protein and energy metabolism in hypopituitary men. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism.* 2005;289(2):E266-E271. doi:10.1152/ajpendo.00483.2004
64. Sawka MN, Leon LR, Montain SJ, Sonna LA. Integrated Physiological Mechanisms of Exercise Performance, Adaptation, and Maladaptation to Heat Stress. In: *Comprehensive Physiology.* Wiley; 2011:1883-1928. doi:10.1002/cphy.c100082
65. Andrade MT, Barbosa NHS, Souza-Junior RCS, et al. Determinants of body core temperatures at fatigue in rats subjected to incremental-speed exercise: The prominent roles of ambient temperature, distance traveled, initial core temperature, and measurement site. *Int J Biometeorol.* 2023;67(5):761-775. doi:10.1007/s00484-023-02453-z
66. de Aquino Resende M, Aidar FJ, Vasconcelos Resende RB, et al. Are Strength Indicators and Skin Temperature Affected by the Type of Warm-Up in Paralympic Powerlifting Athletes? *Healthcare.* 2021;9(8):923. doi:10.3390/healthcare9080923
67. Uchôa P, Matos F, Neves EB, et al. Evaluation of two different resistance training volumes on the skin surface temperature of the elbow flexors assessed by thermography. *Infrared Phys Technol.* 2018;93:178-183. doi:10.1016/j.infrared.2018.07.038
68. Araújo LA, Silva LR, Mendes FAA. Digestive tract neural control and gastrointestinal disorders in cerebral palsy. *J Pediatr (Rio J).* 2012;88(6):455-464. doi:10.2223/JPED.2241
69. Holmes GM, Blanke EN. Gastrointestinal dysfunction after spinal cord injury. *Exp Neurol.* 2019;320:113009. doi:10.1016/j.expneurol.2019.113009
70. Sforza E, Margiotta G, Giorgio V, et al. What to Expect of Feeding Abilities and Nutritional Aspects in Achondroplasia Patients: A Narrative Review. *Genes (Basel).* 2023;14(1):199. doi:10.3390/genes14010199
71. Boland M. Human digestion – a processing perspective. *J Sci Food Agric.* 2016;96(7):2275-2283. doi:10.1002/jsfa.7601
72. Sanchez-Jimenez JL, Aparicio I, Romero-Avila JL, Bellot-Arcís C, Cibrián Ortiz de Anda RM, Priego-Quesada JI. Skin temperature measurement in individuals with spinal cord injury during and after exercise: Systematic review. *J Therm Biol.* 2022;105:103146. doi:10.1016/j.jtherbio.2021.103146
73. Shechter A, Boudreau P, Varin F, Boivin DB. Predominance of Distal Skin Temperature Changes at Sleep Onset across Menstrual and Circadian Phases. *J Biol Rhythms.* 2011;26(3):260-270. doi:10.1177/0748730411404677
74. Dittmar M, Möllgaard L, Engelhard F. Menstrual cycle phases and dosage of synthetic hormonal contraceptives influence diurnal rhythm characteristics of distal skin temperature. *Chronobiol Int.* 2024;41(5):684-696. doi:10.1080/07420528.2024.2342945
75. Reilly T. The Menstrual Cycle and Human Performance: An Overview. *Biol Rhythm Res.* 2000;31(1):29-40. doi:10.1076/0929-1016(200002)31:1;1-0;FT029
76. Carpentier VT, Facione J, Detaille V, Rusakiewicz F, Lopez O, Genêt F. Disability-related medication profiles of Paralympic athletes in the Tokyo 2020 French delegation. *Ann Phys Rehabil Med.* 2023;66(6):101736. doi:10.1016/j.rehab.2023.101736
77. Eide PK, Tjølsen A. Effects of serotonin receptor antagonists and agonists on the tail-flick response in mice involve altered tail-skin temperature. *Neuropharmacology.* 1988;27(9):889-893. doi:10.1016/0028-3908(88)90115-3
78. Smolander J, Herm M, Lindqvist A, Kolari P, Laitinen LA. Circadian variation in peripheral blood flow in relation to core temperature at rest. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1993;67(2):192-196. doi:10.1007/BF00376666

79. Cuesta M, Boudreau P, Cermakian N, Boivin DB. Skin Temperature Rhythms in Humans Respond to Changes in the Timing of Sleep and Light. *J Biol Rhythms*. 2017;32(3):257-273. doi:10.1177/0748730417702974
80. Costa CMA, Moreira DG, Sillero-Quintana M, et al. Daily rhythm of skin temperature of women evaluated by infrared thermal imaging. *J Therm Biol*. 2018;72:1-9. doi:10.1016/j.jtherbio.2017.12.002
81. Martchenko A, Martchenko SE, Biancolin AD, Brubaker PL. Circadian Rhythms and the Gastrointestinal Tract: Relationship to Metabolism and Gut Hormones. *Endocrinology*. 2020;161(12). doi:10.1210/endo/bqaa167
82. Ribeiro D, Hampton S, Morgan L, Deacon S, Arendt J. Altered postprandial hormone and metabolic responses in a simulated shift work environment. *Journal of Endocrinology*. 1998;158(3):305-310. doi:10.1677/joe.0.1580305
83. Périard JD, Eijssvogels TMH, Daanen HAM. Exercise under heat stress: thermoregulation, hydration, performance implications, and mitigation strategies. *Physiol Rev*. 2021;101(4):1873-1979. doi:10.1152/physrev.00038.2020

## TABLE LEGENDS

Table 1 – Caloric content and macronutrient quantities per para-athlete according to target macronutrient in each condition. CHO – carbohydrate-meal rich; PTN – protein-meal rich; FAT- fat-meal rich.

Table 2 – Athletes Characteristics. F, female; M, male; \* Eligible impairment type26. # Classification code or weight categories26. § 7 Skinfolds - triceps, subscapular, chest, midaxillary, suprailiac, abdominal, and thigh47.

Table 3 – Biological factors as independent variables in the mixed linear model. B, coefficient representing the magnitude and direction of the effect of the independent variable on the dependent variable, adjusted for random and fixed effects; t, significance and precision value of the B coefficient (calculated as B/Standard Error of B); p, probability of obtaining a result equal to or more extreme than the observed one, assuming the null hypothesis is true; \* p<0.05; \*\* p<0.001; CI, confidence interval.

Table 4 – Environmental factors as independent variables and interactions in the mixed linear model. B, coefficient representing the magnitude and direction of the effect of the independent variable on the dependent variable, adjusted for random and fixed effects; t, significance and precision value of the B coefficient (calculated as B/Standard Error of B); p, probability of obtaining a result equal to or more extreme than the observed one, assuming the null hypothesis is true; \* p<0.05; \*\* p<0.001; CI, confidence interval.

## FIGURE LEGENDS

Figure 1 – Experimental design; CHO, carbohydrate-rich meal; PTN, protein-rich meal; FAT, fat-rich meal; OVF, overnight fasting; CK, creatine kinase; PRS, perceived recovery status; VAS, visual analog scale.

Figure 2 – Average glycemia at baseline, 60, and 120 minutes for fasting (OVF), carbohydrate-rich (CHO), protein-rich (PTN), and fat-rich meals (FAT). \*, Statistical difference CHO vs. all at the same time-point ( $P < 0.01$ ). #, Statistical difference CHO vs. baseline ( $p < 0.01$ ). Two-way ANOVA analysis.

Figure 3 – Athlete's CK and muscle pain VAS for fasting (OVF), carbohydrate-rich (CHO), protein-rich (PTN), and fat-rich meals (FAT). CK, creatine kinase; VAS, Visual Analogue Scale; i.u., international units; a.u., arbitrary units. \*Statistical difference,  $p < 0.05$ . One-way ANOVA and Friedman's test analysis, respectively.

Figure 4 – Athlete PSR, MS, Fatigue, Stress, Sleep and HI. PSR, Perceived recovery status; MS, Hooper's muscle soreness parameter; Fatigue, Hooper's fatigue parameter; Stress, Hooper's stress parameter; Sleep, Hooper's sleep parameter; HI, Hooper's index; a.u., arbitrary units. \*Statistical difference,  $p < 0.05$ . One-way ANOVA (Sleep, HI, and PSR) and Friedman's test analysis (Stress, Fatigue, and MS).

Figure 5 – Mean and standard deviation of skin temperature in anterior ROIs for fasting (OVF), carbohydrate-rich (CHO), protein-rich (PTN), and fat-rich meals (FAT). ROIs: region of interest.

Figure 6 – Mean and standard deviation of skin temperature in posterior ROIs for fasting (OVF), carbohydrate-rich (CHO), protein-rich (PTN), and fat-rich meals (FAT). ROIs, region of interest.

**Table 1 – Caloric content and macronutrient quantities per para-athlete according to target macronutrient in each condition**

Para-athlete	Total (kcal)	CHO (g)	PTN (g)	FAT (g)
1	575.12	115.02	115.02	51.12
2	394.24	78.85	78.85	35.04
3	286.16	57.23	57.23	25.44
4	371.28	74.26	74.26	33
5	440.16	88.03	88.03	39.13
6	462	92.40	92.40	41.07
7	462	92.40	92.40	41.07
8	319.2	63.84	63.84	28.37
9	394.24	78.85	78.85	35.04
10	273.28	54.66	54.66	24.29

CHO – carbohydrate-meal rich; PTN – protein-meal rich; FAT- fat-meal rich

**Table 2 - Athletes Characteristics**

Para-athlete	Impairment type*	Condition	Athlete (Classification)#	Biological Sex	Age (years)	Height (cm)	Body Mass (kg)	Σ of 7 skinfolds (mm) §
1	Physical	Impaired Muscle Power	Up to 107 kg	M	31	171.0	102.7	186.5
2	Physical	Impaired Muscle Power	65 to 75 kg	M	32	174.0	70.4	147.63
3	Physical	Short stature	Up to 55 kg	F	40	128.5	51.1	163.87
4	Physical	Impaired Muscle Power	65 to 72 kg	M	40	172.5	66.3	141.27
5	Physical	Impaired Muscle Power	75 to 80 kg	M	47	185.0	78.6	102.67
6	Visual	Visual impairment	F13	F	34	159.5	82.5	218.1
7	Physical	Hypertonia	F37	M	28	173.5	82.5	173.33
8	Physical	Hypertonia Ataxia	/ F33	M	21	170.5	48.8	39.27
9	Physical	Impaired Range of Movement/Hypertonia	Passive of F37	M	17	162.0	58.6	79.87
10	Physical	Hypertonia Ataxia	/ F32	M	15	163.5	57.2	107.93

F. female; M. male

\* Sports eligible impairment type<sup>26</sup>.

# Classification code or weight categories<sup>26</sup>.

§ 7 Skinfolds - triceps. subscapular. chest. midaxillary. supriliac. abdominal. and thigh<sup>47</sup>.

**Table 3 – Biological factors as independent variables in the mixed linear model**

Predictors	b	t	p	CI
Intercept	14.041	17.424	<0.001**	12.471; 15.611
Time (T <sub>POS</sub> )	-0.002	-4.676	<0.001**	-0.003; -0.001
<i>Biological factors</i>				
Age	-0.037	-10.251	0.002*	-0.048; -0.025
Biological sex (0 male; 1 female)	0.293	3.52	0.039*	0.030; 0.556
Pre-meal temperature (T <sub>PRE</sub> )	0.418	21.97	<0.001**	0.381; 0.455
Region: dominant anterior arm	0.234	4.691	<0.001**	0.137; 0.331
Region: dominant posterior arm	-0.775	-15.106	<0.001**	-0.875; -0.675
Region: non-dominant posterior arm	-0.817	-16.013	<0.001**	-0.916; -0.717
Region: dominant anterior deltoid	0.183	3.63	<0.001**	0.085; 0.281
Region: non-dominant anterior deltoid	0.084	1.694	0.091	-0.013; 0.181
Region: dominant posterior deltoid	-0.173	-3.784	<0.001**	-0.263; -0.084
Region: non-dominant posterior deltoid	-0.199	-4.346	<0.001**	-0.289; -0.110
Region: dominant pectoral	0.191	3.886	<0.001**	0.095; 0.286
Region: non-dominant pectoral	0.214	3.974	<0.001**	0.109; 0.320

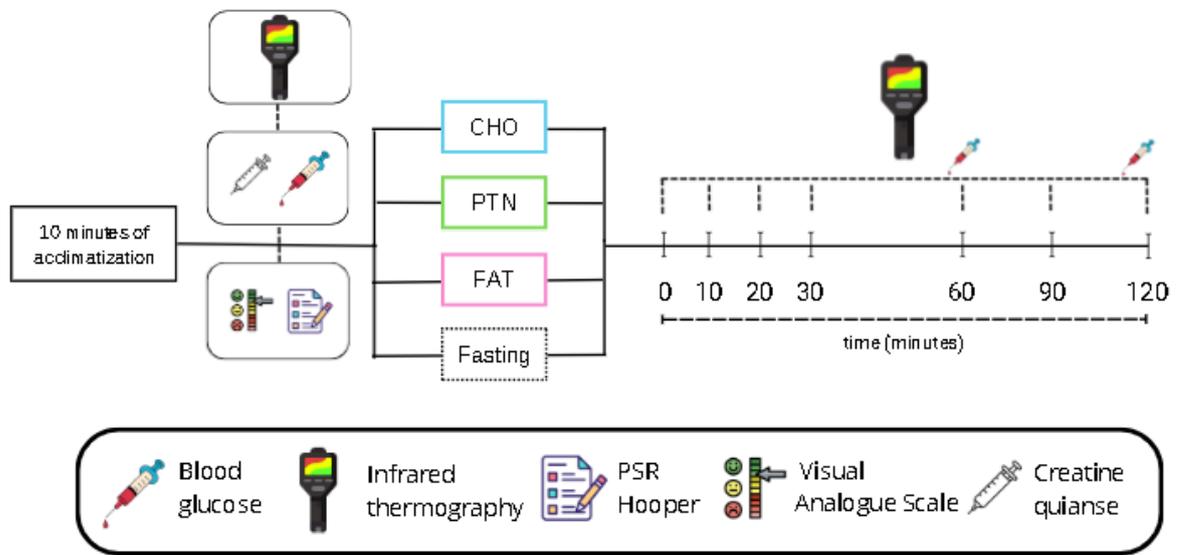
B, coefficient representing the magnitude and direction of the effect of the independent variable on the dependent variable, adjusted for random and fixed effects; t, significance and precision value of the B coefficient (calculated as B/Standard Error of B); p, probability of obtaining a result equal to or more extreme than the observed one, assuming the null hypothesis is true; \* p<0.05; \*\* p<0.001; CI, confidence interval.

**Table 4 – Environmental factors as independent variables and interactions in the mixed linear model**

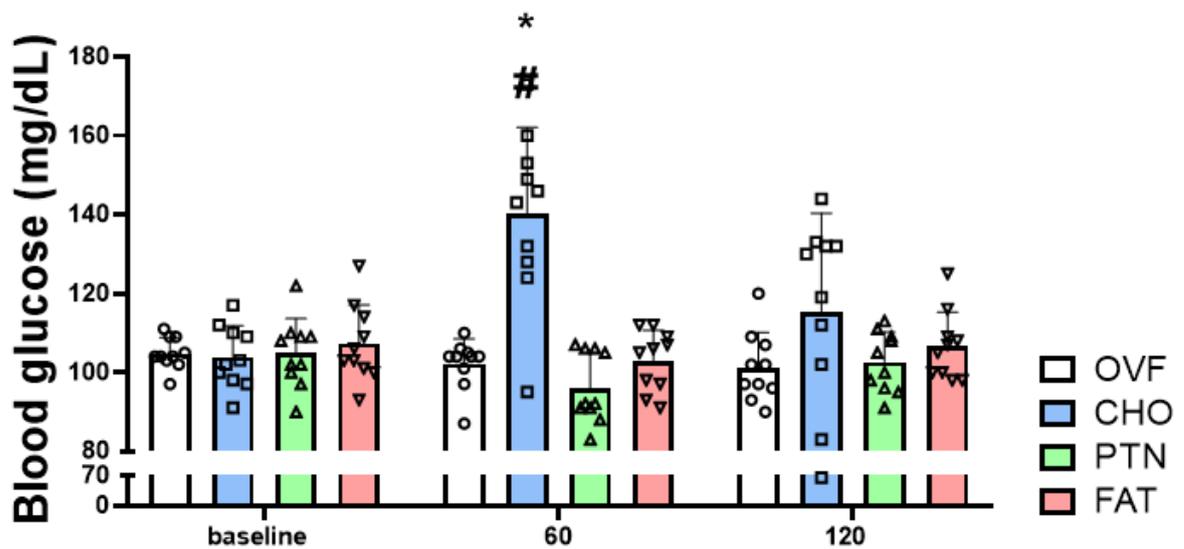
Predictors	b	t	p	CI
Muscle-related medications	0.849	12.108	0.001**	0.627; 1.071
Psychotropic medications	-0.139	-2.598	0.081	-0.308; 0.030
Oral contraceptive	0.576	6.823	0.006*	0.309; 0.843
Ambient temperature (T <sub>AMB</sub> )	0.184	8.02	<0.001**	0.139; 0.228
Relative humidity (RH)	0.015	7.357	<0.001**	0.011; 0.019
Period of data collection (0 morning; 1 afternoon)	1.096	9.203	0.003*	0.719; 1.472
<i>Interactions</i>				
Time vs. CHO	0.004	7.305	<0.001**	0.003; 0.006
Time vs. PTN	0.003	5.339	<0.001**	0.002; 0.004
Age vs. PTN	0.005	1.842	0.066	-0.000; 0.001
Age vs. FAT	-0.006	-2.86	0.004*	-0.010; -0.002
Period of data collection vs. PTN	0.357	3.196	0.001**	0.139; 0.575
Order of data collection vs. CHO	-0.034	-1.054	0.292	-0.097; 0.029
Physical impairment vs. PTN	-0.22	-2.951	0.003*	-0.365; -0.075
Physical impairment vs. FAT	0.198	2.796	0.005*	0.060; 0.336
Dominant anterior deltoid vs. PTN	0.143	1.812	0.07	-0.011; 0.296
Dominant anterior arm vs. FAT	-0.164	-2.055	0.04*	-0.319; -0.009
Non-dominant anterior deltoid vs. FAT	-0.184	-2.308	0.021*	-0.339; -0.029
Non-dominant pectoral vs. FAT	-0.151	-1.71	0.087	-0.323; 0.021
Time vs. Psychotropic medications	-0.002	-4.142	<0.001**	-0.003; -0.001
Time vs. Muscle-related medications	-0.004	-6.533	<0.001**	-0.006; -0.003

B, coefficient representing the magnitude and direction of the effect of the independent variable on the dependent variable, adjusted for random and fixed effects; t, significance and precision value of the B coefficient (calculated as B/Standard Error of B); p, probability of obtaining a result equal to or more extreme than the observed one, assuming the null hypothesis is true; \* p<0.05; \*\* p<0.001; CI, confidence interval.

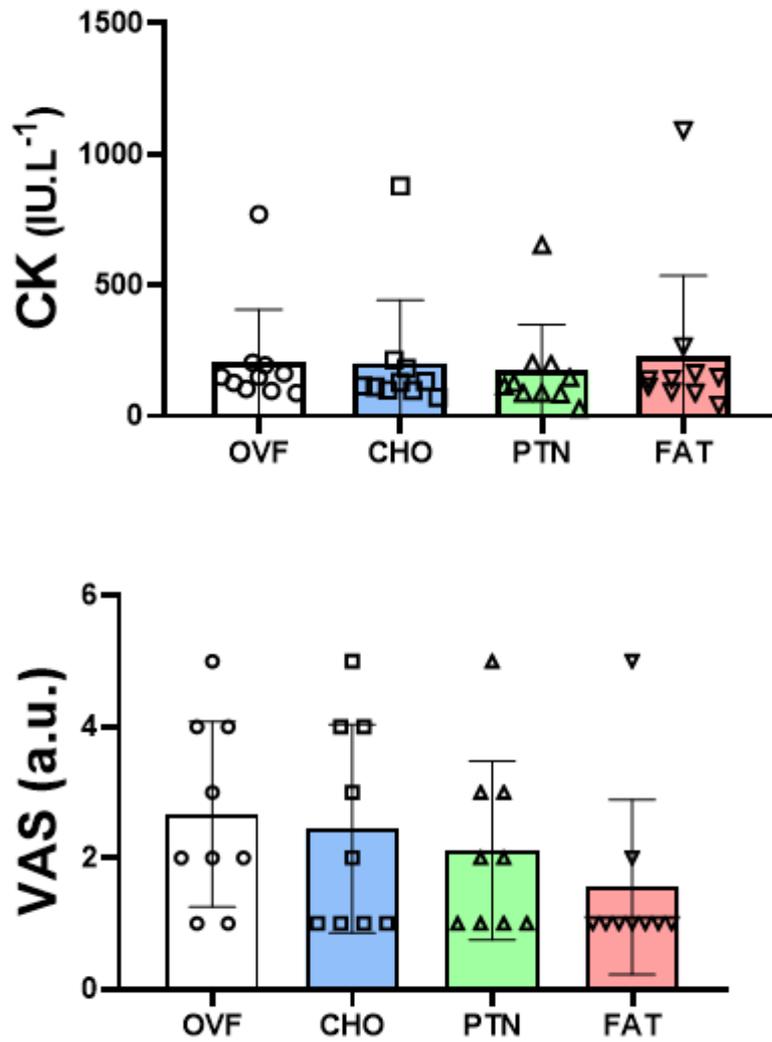
**Figure 1** – Experimental design; CHO, carbohydrate-rich meal; PTN, protein-rich meal; FAT, fat-rich meal; OvF, overnight fasting; PRS, perceived recovery status, VAS, visual analog scale; CK, creatine kinase



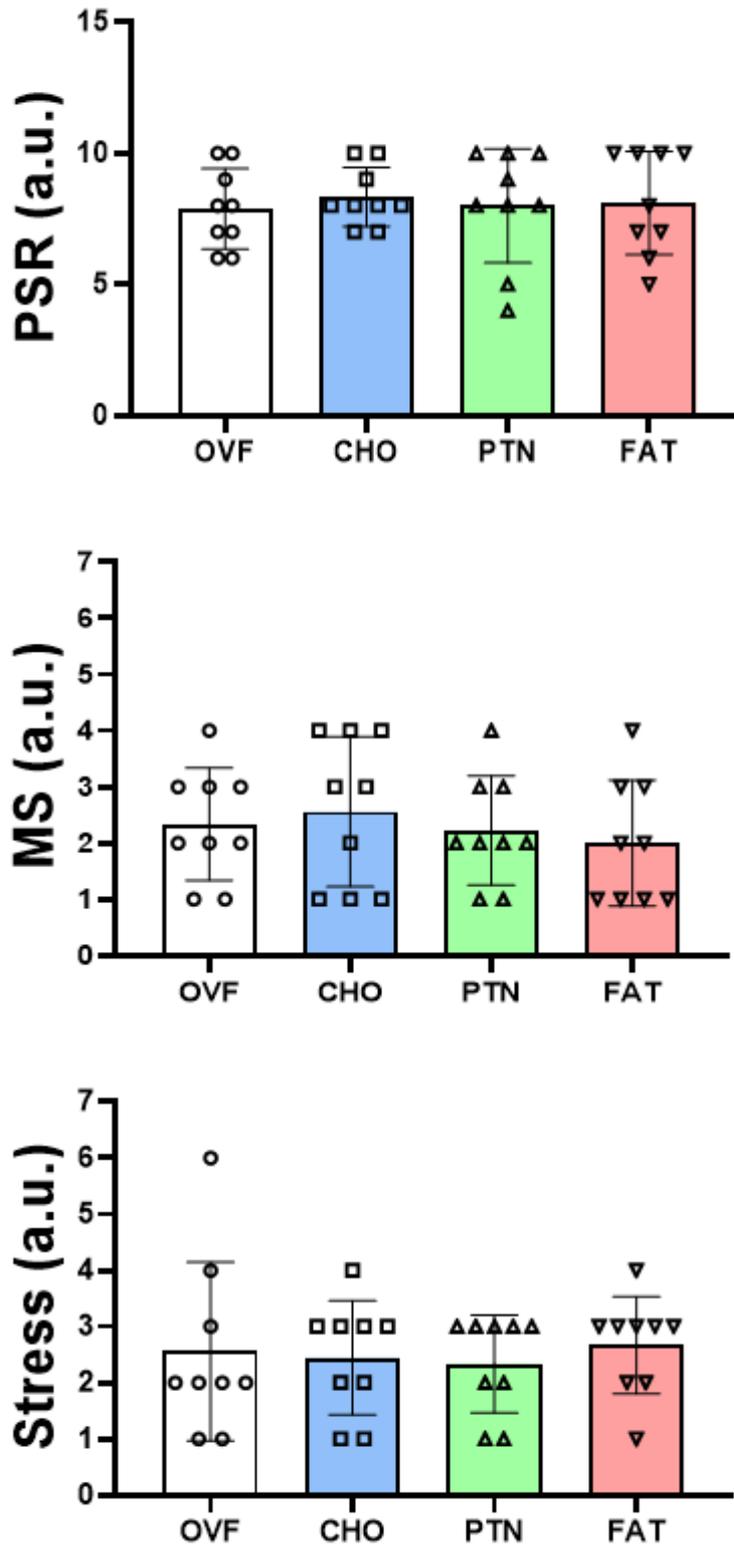
**Figure 2** – Glycemia at baseline, 60, and 120 minutes for fasting (OvF), carbohydrate-rich (CHO), protein-rich (PTN), and fat-rich meals (FAT). \*, Statistical difference CHO vs. all at the same time-point ( $P < 0.01$ ). #, Statistical difference CHO vs. baseline ( $p < 0.01$ ). Two-way ANOVA analysis.

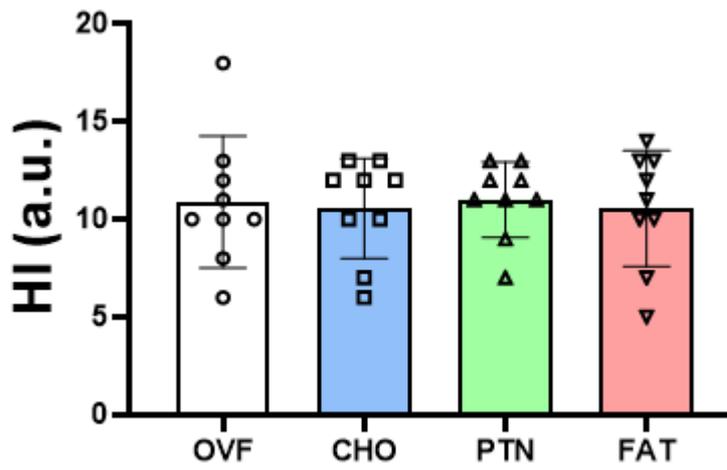
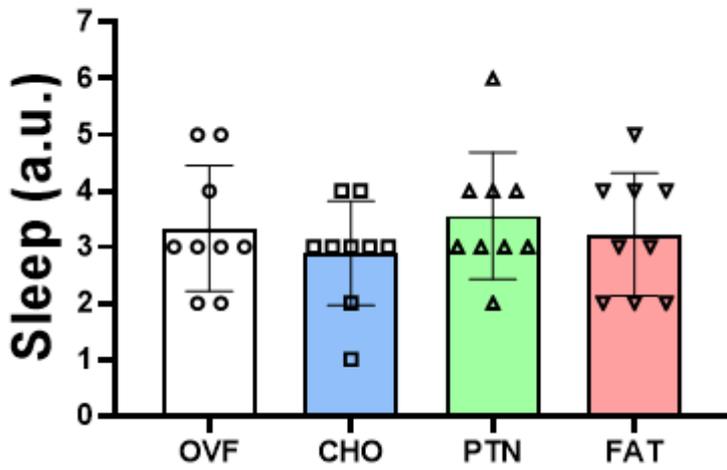
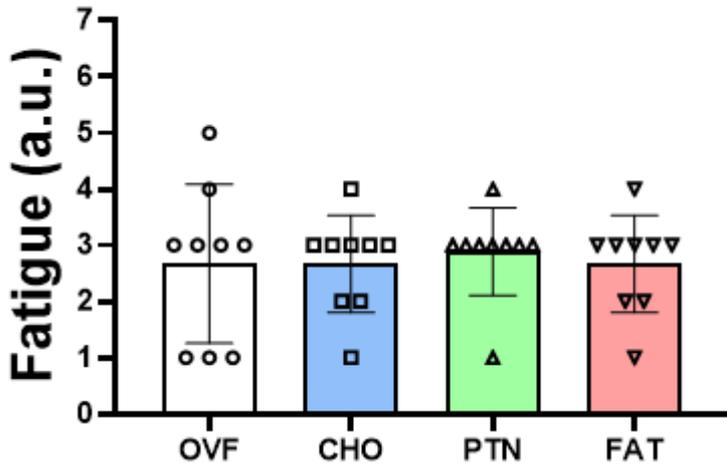


**Figure 3** – Athlete's CK and pain VAS for fasting (OvF), carbohydrate-rich (CHO), protein-rich (PTN), and fat-rich meals (FAT). CK, creatine kinase; VAS, Visual Analogue Scale; i.u., international units; a.u., arbitrary units. \*Statistical difference,  $p < 0,05$ . One-way ANOVA and Friedman's test analysis, respectively.

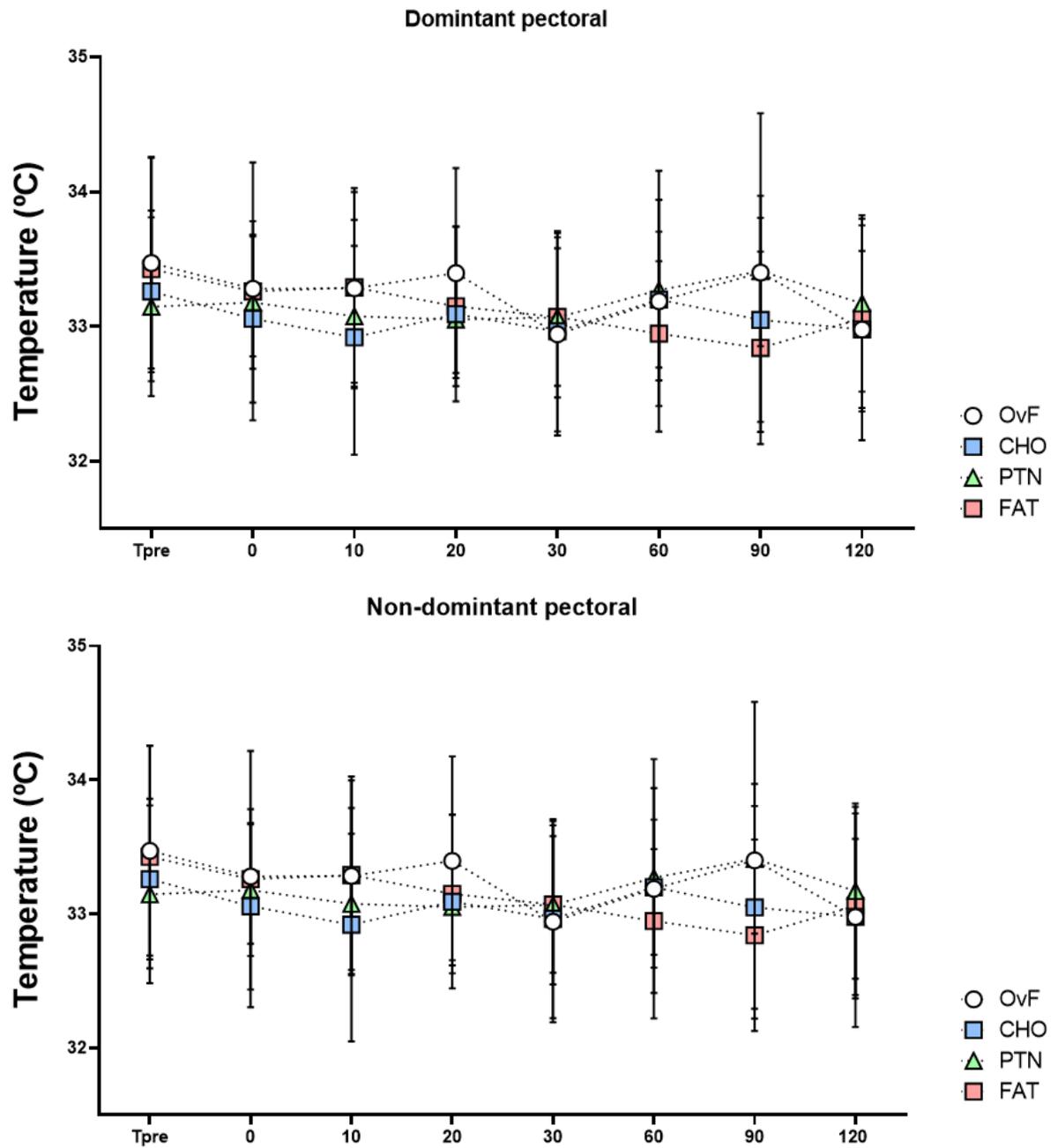


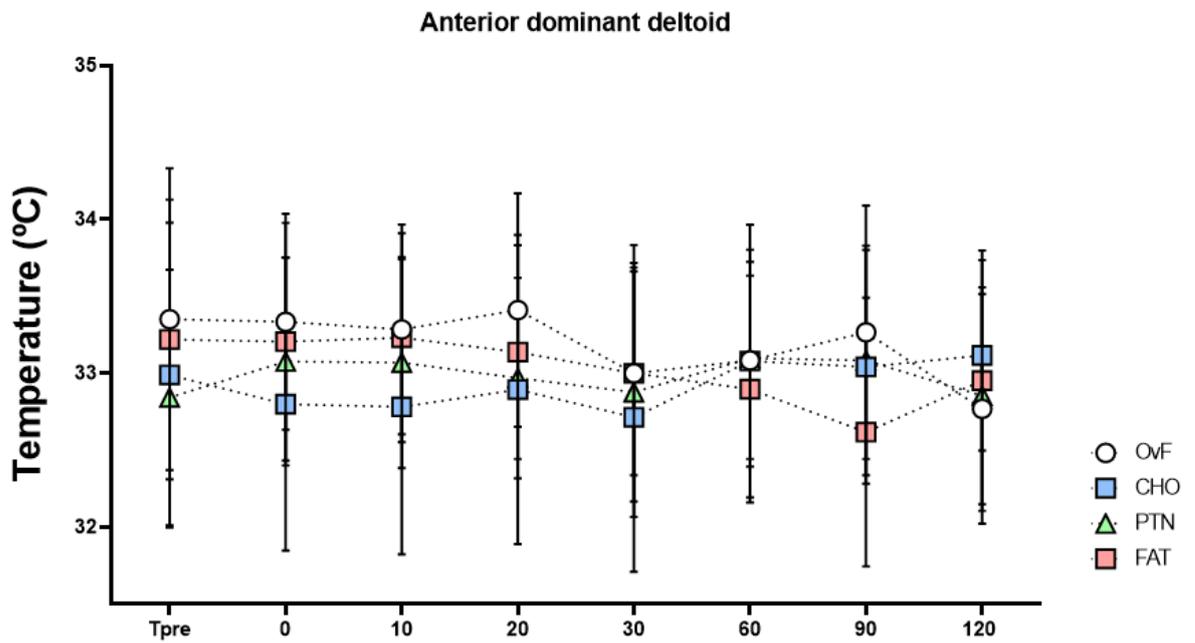
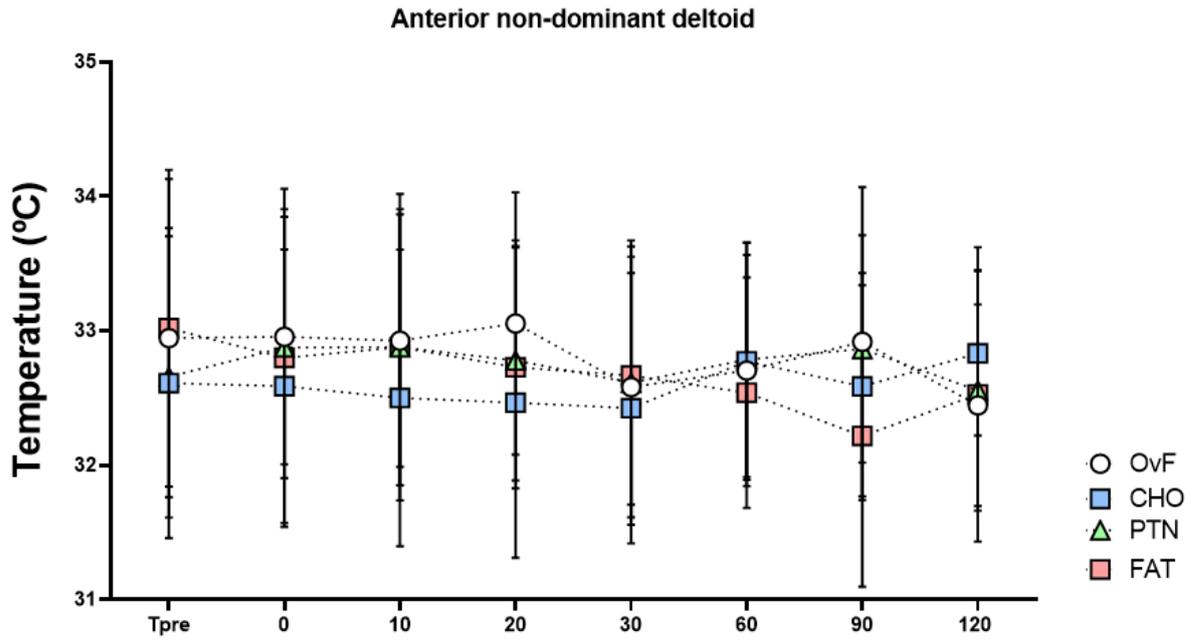
**Figure 4** – Athlete PSR, DOMS, Fatigue, Stress, Sleep and HI. PSR, Perceived recovery status; DOMS, Hooper’s muscle soreness parameter; Fatigue, Hooper’s fatigue parameter; Stress, Hooper’s stress parameter; Sleep, Hooper’s sleep parameter; HI, Hooper’s index; a.u., arbitrary units. \*Statistical difference,  $p < 0,05$ . One-way ANOVA and Friedman’s test analysis.

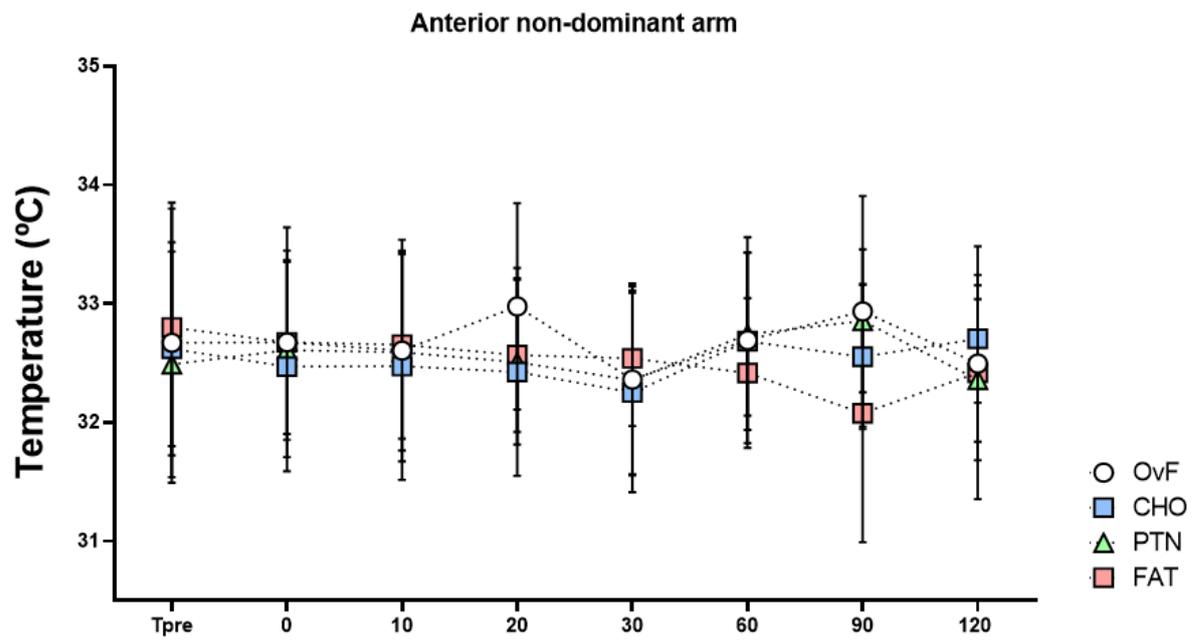
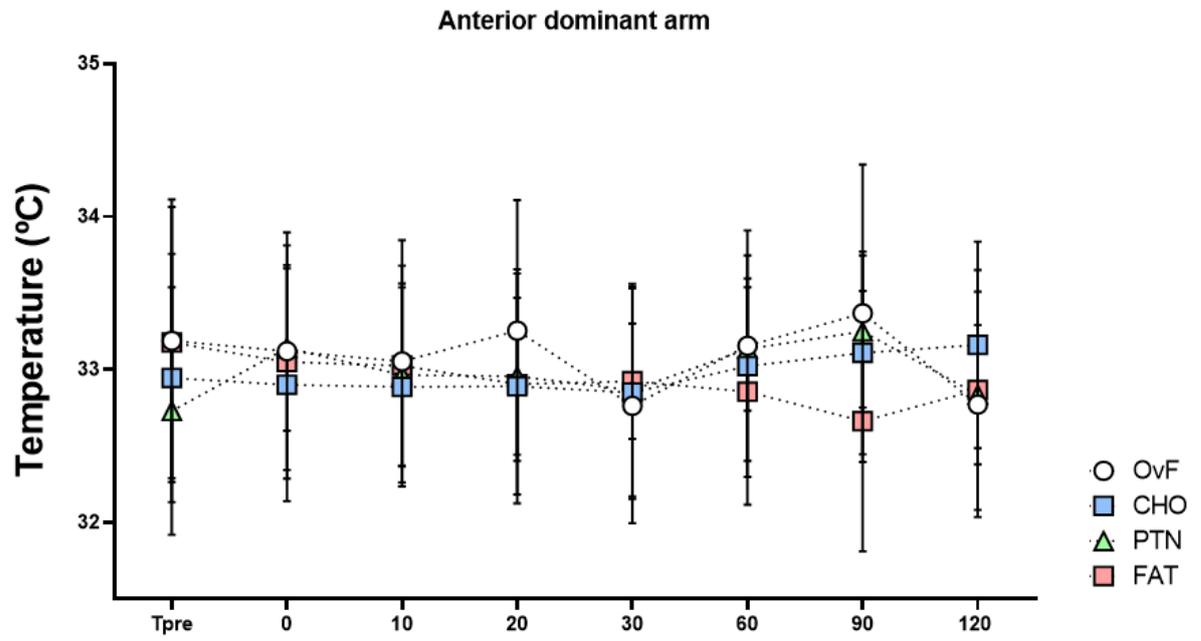




**Figure 5** – Mean and standard deviation of skin temperature in anterior ROIs for fasting (OVF), carbohydrate-rich (CHO), protein-rich (PTN), and fat-rich meals (FAT). ROIs: region of interest.







**Figure 6** – Mean and standard deviation of skin temperature in posterior ROIs for fasting (OVF), carbohydrate-rich (CHO), protein-rich (PTN), and fat-rich meals (FAT). ROIs, region of interest.

