

**JUSSARA NASCIMENTO CHAVES**

**DINÂMICA DA TROCA DE CALOR ATRAVÉS DO  
BICO DO TUCANO TOCO, *RAMPHASTOS TOCO*  
(PICIFORMES, RAMPHASTIDAE)**



Rio Claro  
2012

JUSSARA NASCIMENTO CHAVES

DINÂMICA DA TROCA DE CALOR ATRAVÉS DO BICO DO TUCANO-  
TOCO, *RAMPHASTOS TOCO* (PICIFORMES, RAMPHASTIDAE)

Orientador: Denis Vieira de Andrade

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Biociências da Universidade  
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” -  
Câmpus de Rio Claro, para obtenção do grau de  
Bacharel em Ciências Biológicas

Rio Claro  
2012

598.2 Chaves, Jussara Nascimento  
C512d Dinâmica da troca de calor através do bico do  
tucano-toco, *Ramphastos toco* (Piciformes, Ramphastidae) /  
Jussara Nascimento Chaves. - Rio Claro : [s.n.], 2012  
36 f. : il., gráfs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Ciências Biológicas) -  
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de  
Rio Claro  
Orientador: Denis Otavio Vieira de Andrade

1. Ave. 2. Termorregulação. 3. Ajustes vasomotores. 4.  
Janela térmica. I. Título.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Julio e Nice e às minhas queridas irmãs Jeane e Juliana, como forma de agradecimento por toda a confiança e orgulho que sempre demonstraram por mim e também pelo apoio nas horas mais difíceis.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me proporcionou força, determinação e esperança durante toda essa caminhada. Me mostrou a luz nos momentos de desânimo e tristeza e renovou minha fé diante das dificuldades que enfrentei.

À minha família, pais e irmãs por todo apoio, amor e carinho que sempre me deram. À união que sempre tivemos. Obrigada por serem sempre o meu refúgio! Sou muito grata à minha irmã Jeane que várias vezes esteve presente nas festas da faculdade comigo e também durante os experimentos com os tucanos, tomando chuva, levando bicadas e outros leves acidentes. Agradeço também ao restante da minha família que sempre apoiou a minha carreira acadêmica e me incentivou. Obrigada Tilú, por se interessar pelas minhas atividades, por tentar me ajudar com os tucanos e por me fazer companhia nas férias em Rio Claro!

Aos meus amigos de classe, CBI 2009, o meu eterno muito obrigada! Vocês foram a minha segunda família, me fizeram homenagens, me fizeram criar forças e conhecer o verdadeiro valor da amizade!! Às minhas amigas de risadas, choros e baladas: começando pela Rep Maravilha (Lê e Lary-Sushi), Biguinha, Pukinha (Bisnaguinha), Carica, Dani, Van, Brê, Luá entre outras.

Aos grandes amigos do jacarezário, Dri e Gui, que me ajudaram muitas vezes com experimentos, manutenção dos tucanos e que sempre foram ótimas companhias. Ao Jonny e Carlinhos que me ajudaram também com experimentos e manutenção dos animais em cativeiro.

Ao meu orientador Denis que, apesar das broncas, sempre procurou extrair o melhor de mim, sabendo das minhas dificuldades e capacidades e que tornou a realização deste trabalho possível.

## RESUMO

A regulação da temperatura corpórea, diante de variações da temperatura ambiente e/ou da taxa de produção de calor metabólico, envolve mecanismos reguladores da taxa de troca de calor entre o animal e o ambiente. Um destes mecanismos consiste na modulação da temperatura superficial de áreas específicas do corpo do animal, via ajustes vasomotores, que podem atuar tanto no sentido de promover a dissipação de calor (em uma situação de aumento da temperatura) quanto na retenção deste (em uma situação de queda de temperatura). Neste contexto, alguns animais exibem partes do corpo, como orelhas, membros, cauda, etc. que funcionam de maneira otimizada para realizar esta troca de calor. Nestes casos, estas partes são referidas como “janelas térmicas” e possuem em comum três características básicas: 1 - alta área superficial; 2 - baixo isolamento térmico; 3 - boa vascularização e controle do fluxo sanguíneo na dependência da temperatura.

Recentemente, o uso do bico como uma janela térmica foi descrito para o tucano-toco, *Ramphastos toco* (Aves, Ramphastidae), revelando ser esta uma estrutura com a maior capacidade de troca térmica já identificada. Naquele estudo, porém, a temperatura superficial das aves (bico) foi monitorada enquanto elas eram submetidas a mudanças bastante lentas (ao longo de várias horas) da temperatura ambiente, de forma que a dinâmica temporal da resposta exibida pelas aves permanecia ainda bastante desconhecida. Além disso, sabe-se que os membros das aves também atuam como importantes vias para troca de calor com o ambiente, e no caso do tucano toco, a regulação da temperatura superficial desses apêndices frente a variações da temperatura não tinha sido estudada.

Portanto, o objetivo do presente estudo foi investigar a velocidade com que os ajustes vasomotores subjacentes à modulação da temperatura superficial do bico e das patas do tucano-toco ocorrem. Ademais, nossos dados revelam que o uso do bico para regular a troca de calor com o ambiente por *R. toco* ocorre de maneira bastante rápida, sob diversas condições de variação de temperatura mais de 90% da resposta vasomotora ocorre em menos de 15 minutos de exposição às condições experimentais. Além disso, a quantidade de calor passível de ser dissipada através do bico (até 4,6 W) foi estimada como sendo superior em quase 4 vezes àquela passível de ocorrer através das patas (1,2 W). Neste contexto, o bico foi responsável por até 73% do total de calor dissipado para o ambiente através da superfície corpórea da ave, enquanto as patas atingiram o máximo de 23,5% de calor dissipado em relação ao total, indicando que, de fato, o bico representa a via de maior importância para a troca de calor entre o tucano-toco e o ambiente.

## SUMÁRIO

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1) INTRODUÇÃO.....</b>                                                    | <b>6</b>  |
| <b>2) MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                           | <b>8</b>  |
| <b>2.1) Animais.....</b>                                                     | <b>8</b>  |
| <b>2.2) Protocolo experimental.....</b>                                      | <b>9</b>  |
| 2.2.1 – Série Experimental I: Variações rápidas da temperatura ambiente..... | 9         |
| 2.2.2 – Série Experimental II: Variações agudas da temperatura ambiente..... | 9         |
| 2.2.3 - Série Experimental III: Dissipação de calor metabólico.....          | 10        |
| 2.2.4 - Série Experimental IV: O papel das patas na troca de calor.....      | 10        |
| <b>2.3) Termografia infra-vermelha.....</b>                                  | <b>11</b> |
| <b>2.4) Análise quantitativa da troca de calor.....</b>                      | <b>11</b> |
| <b>2.5) Análises estatísticas.....</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>3) RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                        | <b>14</b> |
| <b>3.1) Variações rápidas da temperatura ambiente.....</b>                   | <b>14</b> |
| 3.1.1 – Resfriamento.....                                                    | 14        |
| 3.1.2 – Aquecimento.....                                                     | 17        |
| <b>3.2) Variações agudas da temperatura ambiente.....</b>                    | <b>20</b> |
| 3.2.1 – Resfriamento.....                                                    | 20        |
| 3.2.2 – Aquecimento.....                                                     | 22        |
| <b>3.3) Dissipação de calor metabólico.....</b>                              | <b>24</b> |
| <b>3.4) O papel das patas na troca de calor.....</b>                         | <b>25</b> |
| 3.4.1 – Resfriamento.....                                                    | 25        |
| 3.4.2 – Aquecimento.....                                                     | 26        |
| <b>3.5) Análise quantitativa da troca de calor.....</b>                      | <b>28</b> |
| <b>4) CONCLUSÃO .....</b>                                                    | <b>30</b> |
| <b>5) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                    | <b>32</b> |

## 1)INTRODUÇÃO

As aves, assim como outros endotérmicos, utilizam-se primordialmente da produção de calor metabólico para a regulação da temperatura corpórea o que, por sua vez, implica em um custo energético considerável. Para a regulação da temperatura corpórea em níveis adequados, animais endotérmicos devem equacionar as taxas de produção de calor (metabolismo) com as taxas de troca de calor com o ambiente (DAWSON & WHITTOW, 2000; MOYES *et al*, 2006). Na dependência de uma série de características do animal considerado, mormente tamanho e condutância, haverá, portanto, uma faixa de temperatura ótima na qual o custo metabólico da regulação da temperatura corpórea é mínimo. Esta faixa é referida como Zona de Neutralidade Térmica (ZNT) e indica o intervalo no qual uma variação da temperatura ambiente pode ser acomodada sem que haja um incremento no gasto energético. Ou seja, dentro da ZNT, a taxa de troca de calor pode ser ajustada através de mecanismos regulatórios de custo energético nulo ou muito reduzido (WITHERS, 1992; HILL *et al.*, 2004; MOYES *et al*, 2006).

Uma vez que o calor produzido é eventualmente dissipado para o ambiente através da superfície corpórea, uma forma simples e largamente empregada por diversos animais para regular a troca de calor com o ambiente é controlar a distribuição regional do calor através das diferentes partes do corpo. Através da modificação no grau de irrigação local, a temperatura superficial de regiões específicas do corpo pode ser controlada de forma a favorecer ou minimizar a troca de calor através desta região. Este ajuste vasomotor permite que o animal controle até certo ponto (dado pelo limite mínimo e máximo da ZNT) as taxas de troca de calor com o ambiente através de um ajuste periférico que não implica em um gasto energético adicional (HILL *et al*, 2004; WILLMER *et al*, 2005). Isto denota a importância adaptativa e as vantagens termorregulatórias e energéticas deste tipo de ajuste.

Dentro deste contexto, as chamadas “janelas térmicas”, termo introduzido para descrever regiões corpóreas que funcionam como trocadores de calor otimizados, assumem especial relevância. Tais janelas são caracterizadas por uma grande área superficial, baixo isolamento e alta vascularização acompanhada da capacidade de regulação do fluxo sanguíneo em função da temperatura ambiente (WILLIAM, 1990). Por exemplo, em uma situação de aumento da temperatura



haverá um aumento do fluxo sanguíneo para a janela térmica cuja temperatura superficial aumentará e promoverá a dissipação deste excesso de calor de forma eficiente através de sua grande e pouco isolada área superficial (WILLMER *et al*, 2005). Em uma situação de queda de temperatura, os ajustes ocorrerão na direção contrária promovendo a conservação do calor metabólico. Exemplos de janelas térmicas incluem as orelhas dos elefantes (PHILLIPS & HEATH, 1992), das lebres (STITT, 1976) e de alguns canídeos (HILL *et al*, 1980 ), os apêndices locomotores de animais vivendo em ambientes polares (IRVING & KROG, 1955), as asas de morcegos (KLUGER & HEATH, 1970 ) e a cauda de alguns roedores (RAMAN *et al*, 1983 ). Recentemente, o bico do tucano-toco, *Ramphastos toco*, foi identificado como, muito possivelmente, a janela térmica mais eficiente conhecida até o momento (TATTERSALL *et al*, 2009).

Os tucanos de uma maneira geral, família Ramphastidae, tem como característica marcante o bico de tamanho bastante avantajado e, dentre os membros desta família, o tucano-toco apresenta um dos maiores bicos, tanto em proporção como em tamanho absoluto (ALVARENGA, 2004), correspondendo a cerca de 40% da superfície corpórea total das aves (TATTERSALL *et al*, 2009). Os tucanos utilizam o bico para a realização de diversas funções, como descascar frutos (JONES, 1985), para defesa de território (WEST-EBERHARD, 1983) e também como um alerta visual de perigo (BUHLER, 1997). No bico dos tucanos, entre a camada córnea e as partes ósseas, há uma rede superficial de vasos sanguíneos que se ramifica na derme (TRAILL, 1815; HAGAN & HEATH, 1980). Tal característica aliada à grande área superficial representada pelo bico e à ausência de isolamento (uma vez que o bico é desprovido de penas) qualifica este apêndice como uma janela térmica. Esta função do bico do tucano foi confirmada recentemente através do estudo de Tattersall *et al* (2009), que submeteu jovens e adultos de tucano-toco a variações de temperatura ambiente entre 10°C e 35°C enquanto a temperatura superficial das aves era monitorada por termografia infravermelha. Os resultados obtidos por estes autores demonstraram claramente que o bico do tucano-toco funciona como uma janela térmica permitindo a dissipação de calor em temperaturas altas e, por outro lado, a conservação do calor metabólico em situações de baixas temperaturas. Mais que isso, Tattersall *et al*. (2009) estimaram que o bico do tucano-toco tem o potencial de dissipar entre 25% e 400%

do total de calor metabólico produzido (em condições basais), o que o qualifica como um dos trocadores de calor mais eficientes do reino animal.

Ajustes na irrigação sangüínea em resposta a estímulos específicos (ambientais ou internos) podem ocorrer de maneira bastante rápida e levar a alterações igualmente rápidas da temperatura superficial de regiões específicas do corpo. No caso do tucano-toco, por exemplo, a realização de exercício (vôo) leva a um aumento nas taxas de produção de calor que, em questão de minutos, é refletida pelo aumento da temperatura superficial do bico (TATTERSALL *et al*, 2009). Isto representa um forte indicativo de que, nestas aves, os ajustes vasomotores da região do bico em resposta à variações da temperatura ambiente também possam ocorrer de forma bastante rápida. No entanto, a dinâmica temporal da resposta vasomotora do bico do tucano-toco em função da temperatura ambiental permanece desconhecida, pois, nos experimentos referidos acima, os autores submeteram as aves à variações bastante lentas da temperatura ambiente (de 10°C a 35°C, em doze horas).

Além disso, embora haja conhecimento de ajustes vasomotores que atuam nas patas de algumas aves de forma semelhante ao bico (BANTA *et al*, 2004; KILGORE & SCHMIDT-NIELSEN, 1975), no tucano-toco a modulação da temperatura superficial das patas em resposta a variações da temperatura ambiente também permanece desconhecida. Desta forma, o objetivo do presente projeto consistiu em investigar a dinâmica temporal dos ajustes vasomotores (via alterações da temperatura superficial) do bico e das patas do tucano-toco, *Ramphastos toco*, quando submetidos às variações rápidas da temperatura ambiente. Adicionalmente, nós também averiguamos o papel do bico na dissipação do calor metabólico, pós vôo, uma vez que os resultados de Tattersall *et al* (2009) sobre este aspecto foram baseados em poucos exemplares.

## **2)MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1- Animais**

Os exemplares de *Ramphastos toco* foram obtidos através da doação de exemplares excedentes de zoológicos (licença IBAMA = 27171-1). As aves foram

mantidas aos pares em viveiros ao ar livre (com dimensões de 6 x 10 x 3 metros) no Laboratório de Fisiologia Animal Comparada da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", campus de Rio Claro, SP. As aves receberam uma dieta variada de frutas e ração (Clube Tucanos; Alcon, SC) oferecidas duas vezes ao dia. Em cada viveiro as aves tinham livre acesso à abrigos, água, poleiros e área coberta.

O Tucanuçu é um animal onívoro que se alimenta, somente durante o dia, de insetos, ovos, lagartos e principalmente frutos (AUSTIN, 1987). Apresenta em média 56 cm de comprimento e pesa cerca de 540 gramas, sendo o maior representante de todos os tucanos. Não possui dimorfismo sexual, sua característica mais marcante é o grande bico amarelo-alaranjado que pode chegar até 22 cm. A plumagem é negra da coroa ao dorso e no ventre, apresenta ao redor do olho uma pele nua amarela e suas pálpebras são azuladas. O papo e o uropígio são brancos e a plumagem embaixo da cauda é avermelhada. É encontrado nas florestas tropicais da América do Sul, desde as Guianas até o norte da Argentina (SICK, 1986).

## **2.2 – Protocolo Experimental**

### **2.2.1– Série Experimental I – Variações rápidas da temperatura ambiente**

As aves foram inicialmente colocadas e mantidas em uma câmara climática (marca e modelo) para aclimação nas temperaturas de 35°C ou 10°C. Este período de aclimação teve duração de 60 minutos, tempo previamente confirmado como suficiente para que as aves seguramente entrassem em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente. Após este período inicial de aclimação, para o experimento iniciado a 35°C, a temperatura da câmara foi resfriada até 10°C, à uma taxa média de 0,28°C por minuto. Já para o experimento iniciado a 10°C, a câmara climática foi aquecida até a temperatura de 35°C, à uma taxa média de 0,52°C por minuto. Após o término da variação de temperatura, os animais permaneceram na câmara até que um segundo equilíbrio térmico, entre a temperatura corpórea e a temperatura ao final do experimento, fosse atingido.

### **2.2.2 – Série Experimental II – Variações agudas da temperatura ambiente**

Nesta série experimental, nós testamos a capacidade máxima de resposta vasomotora do bico das aves quando submetidas à mudanças agudas da temperatura ambiente. Para tanto, as aves foram aclimatadas nas temperaturas de 35°C ou 10°C, como descrito acima. Após atingido o equilíbrio térmico, monitorado com o visor infravermelho, as aves foram imediatamente transferidas, em no máximo 15 segundos, para uma segunda câmara mantida na temperatura oposta àquela da aclimação (10°C → 35°C; 35°C → 10°C). A partir deste momento, a temperatura superficial das regiões de interesse foi continuamente monitorada até que as aves estabelecessem um novo equilíbrio com a temperatura ambiente.

#### 2.2.3 – Série Experimental III - Dissipação de calor metabólico

As aves foram estimuladas a voar dentro do viveiro em que eram mantidas (6 x 10 x 3 m) de maneira ininterrupta durante 10 minutos (ou até a exaustão) através da simulação de tentativas de captura pelo tratador. A cada minuto, uma pausa rápida (< 20 segundos) era realizada para a tomada das imagens termográficas.

#### 2.2.4 – Série Experimental IV - O papel das patas na troca de calor

Nas séries experimentais descritas acima, o ângulo de posicionamento do visor termográfico para monitoramento das áreas de interesse não permitia a visualização das patas das aves. Assim, a presente série experimental, basicamente uma repetição da Série Experimental I, foi especificamente realizada para averiguar o papel da troca de calor através das patas em resposta à variações rápidas da temperatura ambiente. As aves foram inicialmente colocadas em câmaras climáticas do tipo BOD (Eletrolab, 122-FC) por 60 minutos para aclimação na temperatura de início dos experimentos, 35°C ou 10°C. Para o experimento iniciado a 35°C, a temperatura da câmara foi resfriada a 10°C a uma taxa média de 0,49 graus por minuto. Já para o experimento que se iniciou a 10°C, a câmara climática foi aquecida a 35°C a uma taxa média de 0,6 graus por minuto. Após o término da variação de temperatura, os animais permaneceram na câmara até atingirem um novo equilíbrio térmico entre a temperatura corpórea e a temperatura ambiente ao final do experimento.

### 2.3 - Termografia infra-vermelha

Imagens termográficas das aves submetidas às diferentes Séries Experimentais foram obtidas utilizando-se um visor infravermelho (Flir SC-640) na taxa de 1 frame.s<sup>-1</sup> assumindo uma emissividade de 0.95 (TATTERSALL *et al*, 2004). Utilizando-se ferramentas de rotina específicas do programa de análise de dados (Thermacam Researcher Pro), foram delimitadas áreas de interesse sobre as imagens térmicas das aves. Estas áreas, durante os experimentos que analisaram o bico como trocador de calor (Séries I, II e III), compreenderam: 1 – a região proximal do bico; 2 – a região distal do bico; 3 – dorso (área coberta de penas com mínima ou nula capacidade de ajuste na temperatura superficial; 4 – área ao redor dos olhos (esta área é continuamente irrigada e fornece uma indicação confiável da temperatura corpórea).

Já nos experimentos que analisaram as patas como trocadores de calor, as áreas monitoradas foram: 1 – as falanges proximal, média e distal de um dos dedos anteriores da pata esquerda; 2 – as falanges proximal, média e distal de um dos dedos anteriores da pata direita. Como não detectamos diferenças significativas entre as falanges de uma mesma pata e entre as patas direita e esquerda, nós calculamos a média entre as temperaturas superficiais das três falanges para estimar a temperatura de cada pata e, posteriormente, utilizamos a média das duas patas em todas as análises subsequentes.

A variação da temperatura ambiente durante os experimentos foi continuamente monitorada, também por termografia, em um pedaço de 5 cm de fita isolante (3-M) posicionado dentro do campo visual do visor termográfico. Esta fita tem uma emissividade próxima de 0,95 e praticamente nenhuma inércia térmica, sendo um indicador absolutamente confiável da temperatura ambiente.

De cada uma das áreas de interesse, nós obtivemos a temperatura superficial média, a qual foi analisada temporalmente (minuto a minuto) e/ou em função da variação da temperatura ambiente (grau a grau), dependendo da série experimental.

### 2.4 – Análise Quantitativa da Troca de calor

Para comparar a capacidade de dissipação de calor através das diferentes regiões do corpo (patas, bico, penas e olhos), nós calculamos a quantidade de calor

(em watts) trocado com o ambiente através da superfície dessas áreas tanto por radiação como por condução/convecção. Estes cálculos foram realizados para as variações da temperatura ambiente de 10°C para 35°C e de 35°C para 10°C. Utilizamos as seguintes fórmulas, descritas por Phillips e Sanborn (1994):

$$Q_r = \varepsilon \sigma A (T_s - T_a)$$

$$Q_c = h A (T_s - T_a)$$

$$Q_t = \sum Q_r + \sum Q_c$$

onde,  $T_s$  é a temperatura superficial da região de interesse do corpo (° K);  $T_a$  é a temperatura ambiente (° K);  $A$  é a área de superfície (m<sup>2</sup>);  $\varepsilon$  é a emissividade combinada do objeto e do ambiente (0,97);  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman (5,673e<sup>-8</sup>); e  $H_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção para a região de interesse do corpo analisado (W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup>), o qual foi determinado como:

$$H_c = Nu \cdot k / D$$

onde,  $D$  é a dimensão crítica da região do corpo (isto é, a altura do bico, o comprimento dos dedos e metatarso e o diâmetro do corpo e da área peripalpebral em metros);  $k$  é a condutividade térmica do ar (W · m<sup>-1</sup> · °K<sup>-1</sup>), determinada para cada  $T_a$ , como:

$$k = 0.0241 + 7.5907e^{-6} T_a$$

e  $Nu$  é o número de Nusselt determinado para cada região superficial:

$$Nu = 0.037 Re^{0.6} \text{ para esfera}$$

$$Nu = 0.032 Re^{0.8} \text{ para círculo}$$

$$Nu = c \cdot Re^n \text{ para cilindro}$$

sendo que, bico, dedos e metatarsos foram modelados como um cilindro, os olhos como um círculo e o corpo como uma esfera. Adotamos valores de  $c$  e  $n$  igual a

0,174 e 0,618, quando  $Re \geq 4000$ , e 0,615 e 0,466 quando  $Re < 4000$ .  $Re$  foi determinada utilizando:

$$Re = V.D/u$$

onde  $V$  é a velocidade do ar (considerada como  $5 \text{ m.s}^{-1}$ ),  $D$  é a dimensão crítica, e  $u$  é a viscosidade cinemática do ar ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ), determinada a partir de  $Ta$ :

$$u = -1.088e^{-5} + 8.85e^{-8}Ta$$

A área superficial do bico foi mensurada por análise de fotografias no programa ImageJ versão 1.44e, enquanto a área superficial das patas e metatarsos foi estimada geometricamente modelando-os como um cilindro. Após, as áreas estimadas para as patas e metatarsos foi reduzida a metade, pois durante os experimentos a porção anterior do metatarso permanecia coberta pelas penas da ave e a face inferior dos dedos ficava aderida ao poleiro. A área superficial dos olhos foi estimada geometricamente, como um círculo, a partir da medição do diâmetro desta área nas aves. A área de superfície corpórea (excluindo bico e patas) foi calculada a partir da massa dos animais, utilizando a fórmula  $8,11M^{0,667}$ , descrita em Walsberg e King (1978), onde  $M$  = massa corpórea (gramas).

## 2.5 – Análise estatística

As alterações na temperatura superficial do bico em resposta a alteração da temperatura ambiente foram expressas como diferencial térmico ( $\Delta T$ ) entre a temperatura superficial ( $T_s$ ) e a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), i.e.,  $\Delta T = T_s - T_{amb}$ , calculado para cada grau de variação na temperatura ambiente. Nos experimentos do item 2.2.1 (Variações rápidas da temperatura ambiente) estes dados foram utilizados para identificar a temperatura na qual os ajustes vasomotores começam a ocorrer e para testarmos se as diferenças no diferencial térmico antes e após a ocorrência dos ajustes vasomotores eram ou não estatisticamente significativas. Para tanto, comparamos três pontos antes e após a ocorrência dos ajustes vasomotores através de uma Análise de Variância de Medida Repetida. Um valor de  $P \leq 0,5$  foi adotado como o nível crítico indicativo de diferença estatística. Em caso de diferenças significativas terem sido encontradas, empregamos um procedimento

de comparação múltipla com o método Holm-Sidak. A relação entre o diferencial térmico dos olhos e das penas, face à variação na temperatura ambiente, foi analisada através de uma Regressão Linear.

As alterações na temperatura superficial do bico em resposta a alteração aguda da temperatura ambiente (item 2.2.2 deste trabalho) foram também expressas como  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_s - T_{amb}$ ) e descritas por uma equação polinomial inversa de primeira ordem ( $f=y0+(a/x)$ ). Os dados apresentados nas séries experimentais 2.2.3 e 2.2.4 foram analisados de forma qualitativa.

### 3) RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 - Variações rápidas da temperatura ambiente

O período necessário para a aclimação das aves na temperatura inicial do experimento variou entre 30 minutos a 35°C e 50 minutos a 10°C. Após o início do experimento, o tempo necessário para que um novo equilíbrio térmico fosse estabelecido entre as aves e a temperatura ambiente foi de 50 minutos para aquelas sendo resfriadas (35°C → 10°C) e de 30 minutos para aquelas sendo aquecidas (10°C → 35°C).

##### 3.1.1 Resfriamento

A região dos olhos dos tucanos manteve-se relativamente alta e constante durante toda a variação da temperatura ambiente de 35 para 10°C. Desta forma, o diferencial térmico entre os olhos e a temperatura ambiente, baixo no início do experimento a 35°C (média = 5,86°C;  $\pm 0,65$ ) aumentou gradativamente e de forma linear ( $r^2 = 0,926$ ,  $P < 0,001$ ) com a diminuição da temperatura ambiente até o valor máximo de 24,05°C ( $\pm 0,93$ ) ao final do experimento a 10°C (ver Figura 1). Em valores absolutos, a temperatura superficial dos olhos variou em menos de 7°C ao longo de toda a amplitude de variação da temperatura ambiente (=25°C), o que evidencia a independência da temperatura superficial desta região da temperatura ambiente. Esta observação também denota a alta e constante irrigação sangüínea que esta região recebe e confirma sua adequação como indicativa da temperatura corpórea profunda (ver também Tattersall *et al*, 2009).



A região das penas caracterizou-se por ter uma capacidade praticamente nula de ajuste na temperatura superficial, mantendo-se sempre próxima a temperatura ambiente. Houve uma relação linear entre o diferencial térmico dessa região e a temperatura ambiente ( $r^2 = 0,331$ ;  $P < 0,001$ ). Desta forma, o diferencial térmico entre as regiões cobertas de penas e a temperatura ambiente foi relativamente baixo e manteve-se muito constante ao longo do experimento, atingindo valores médios de  $0,86^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1,51$ ) no início do experimento ( $35^{\circ}\text{C}$ ) com leve incremento de  $4,05^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1,36$ ) ao final quando a temperatura experimental atingiu os  $10^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 1.B). Este pequeno incremento do diferencial térmico, muito provavelmente, se deve à lenta e baixa dissipação do calor corpóreo através da camada isolante de penas.

A região proximal do bico alcançou temperaturas próximas a  $41^{\circ}\text{C}$  na temperatura inicial de  $35^{\circ}\text{C}$ , resultando em um diferencial térmico de  $4,86^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,43$ ) no início do experimento. Com a diminuição progressiva da temperatura ambiente, pode-se observar que a partir dos  $26^{\circ}\text{C}$  ocorre uma nítida vasoconstrição na irrigação desta região do bico com a consequente diminuição do diferencial térmico (ver figura 1.C). Desta forma os diferenciais térmicos obtidos nas três temperaturas imediatamente anteriores ao início dos ajustes vasomotores diferiram significativamente ( $P < 0,001$ ) daqueles encontrados nos três pontos (temperaturas) imediatamente após tais ajustes (ver Tabela 1). Por outro lado, comparados entre si, os 3 pontos antes ou após ocorrência dos ajustes vasomotores não diferiram significativamente ( $P < 0,88$ ).

A região distal do bico apresentou temperaturas um pouco mais baixas do que a região proximal, mas também elevadas no início do experimento a  $35^{\circ}\text{C}$ , com um diferencial térmico de  $3,88^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,39$ ). Após o início do resfriamento, é possível notar o limiar da ocorrência de vasoconstrição nesta região do bico quando a temperatura ambiente atinge  $30^{\circ}\text{C}$ . Desta forma, os diferenciais térmicos obtidos em pontos (temperaturas) antes do início dos ajustes vasomotores foram significativamente diferentes ( $P < 0,001$ ) daqueles encontrados nas temperaturas pós-ajustes (ver Tabela 1). Como esperado, não houve diferença significativa quando os três pontos pré- ou pós-ajustes foram comparados entre si ( $P < 0,739$ ). O ajuste vasomotor na região distal do bico foi consideravelmente mais evidente do que àquele observado para a região proximal e diminuiu acentuadamente a dissipação de calor através desta superfície. Isto é claramente aparente pela redução do diferencial térmico praticamente para zero em temperaturas abaixo de

17°C (Figura 1.D). Por outro lado, a região proximal do bico, possivelmente pela sua proximidade com os tecidos da cabeça e talvez por diferenças no ajuste vasomotor, mesmo nas temperaturas mais baixas testadas sempre manteve algum diferencial térmico com a temperatura ambiente (Figura 1.C). Por exemplo, na temperatura de 10°C, a região proximal do bico manteve temperaturas superficiais próximas dos 14°C (diferencial térmico = 4,36°C;  $\pm 0,40$ ), ao passo que na região distal este diferencial foi de apenas 0,62 °C ( $\pm 0,41$ ).

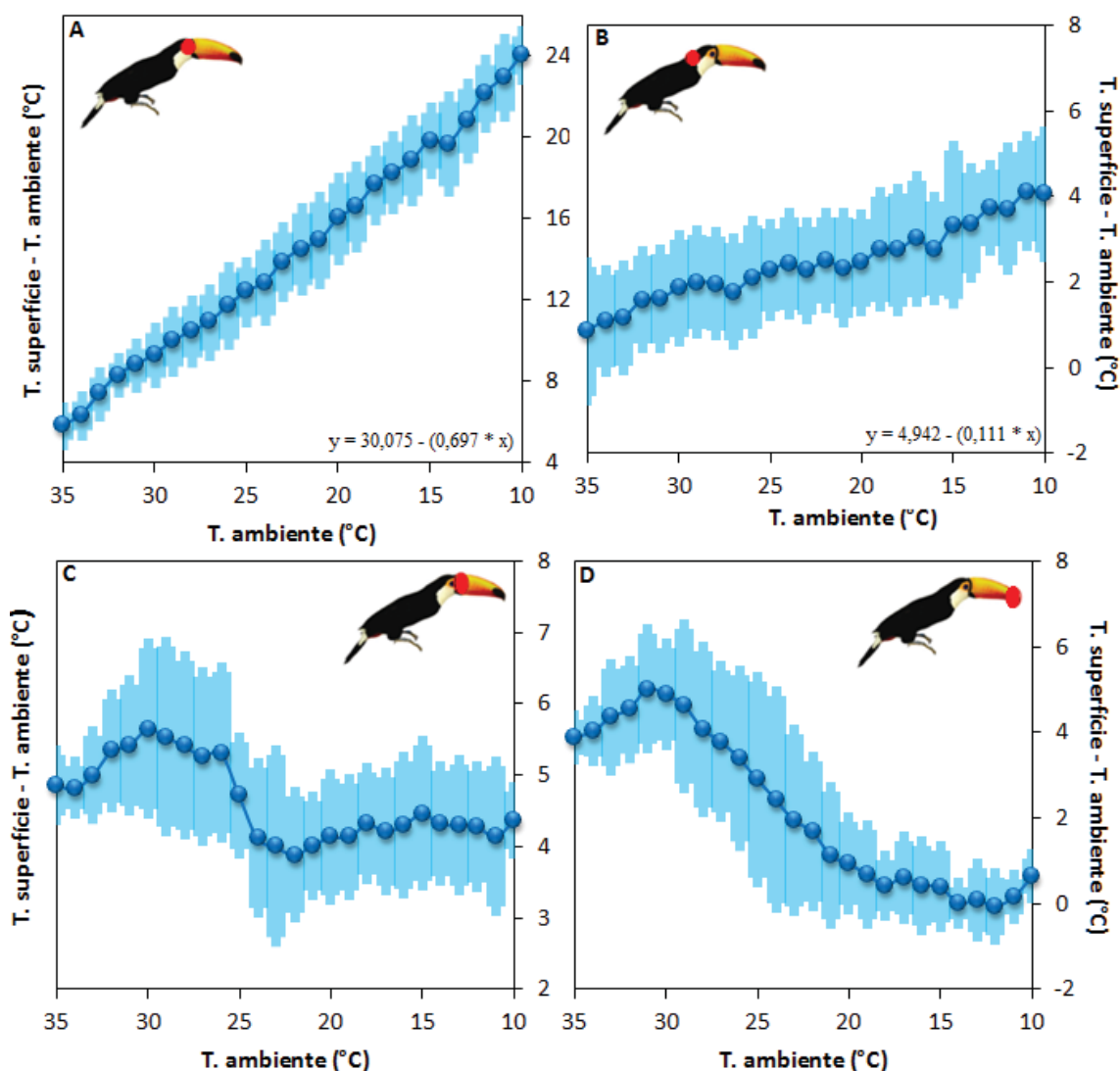


Figura 1. Diferença entre a temperatura superficial do tucano, *Ramphastos toco*, e a temperatura ambiente em resposta a uma diminuição da temperatura de 35°C para 10°C. O gráfico 1.A refere-se a região dos olhos, o 1.B a região das penas, o 1.C a região proximal do bico e o 1.D a região distal do bico. Notar que a escala do eixo x

está invertida para ilustrar o resfriamento no sentido da esquerda para a direita. Símbolos indicam valores médios e área sombreada de azul indica Desvio Padrão.

TABELA 1. Diferencial térmico ( $\Delta T = T. \text{ sup} - T. \text{ amb}$ ) entre a temperatura superficial média da região proximal e distal do bico de *R. Toco* (n=8) e a temperatura ambiente antes (28 a 26°C; 32 a 31°C) e após (23 a 21°C; 19 a 17°C) a ocorrência dos ajustes vasomotores.

|                 | T. ambiente (°C) | $\Delta T = T. \text{ sup} - T. \text{ amb}$ (°C) |
|-----------------|------------------|---------------------------------------------------|
| Região proximal | 28 a 26°C        | 3,96°C $\pm$ 0,89                                 |
|                 | 23 a 21°C        | 5,33°C $\pm$ 1,07                                 |
| Região distal   | 32 a 31°C        | 4,82°C $\pm$ 1,1                                  |
|                 | 19 a 17°C        | 0,57°C $\pm$ 0,81                                 |

### 3.1.2 Aquecimento

Similarmente ao que ocorreu durante o resfriamento, a região dos olhos apresentou um diferencial térmico alto em baixas temperaturas, 22,35°C ( $\pm 0,96$ ) a 10°C, o qual diminuiu progressivamente e de forma linear ( $r^2 = 0,957$ ,  $P < 0,001$ ), com o aumento da temperatura ambiente atingindo um valor de 5,77°C ( $\pm 0,57$ ) a 35°C (ver figura 2. A). Esta observação novamente evidencia a alta irrigação sanguínea desta região com a conseqüente manutenção da temperatura superficial elevada e constante a despeito da variação da temperatura ambiente.

A temperatura superficial da região das penas diferiu minimamente da temperatura ambiente. Os diferenciais térmicos entre esta região e a temperatura ambiente, porém, diminuiram linearmente ( $r^2 = 0,390$ ;  $P < 0,001$ ) com o aumento da temperatura ambiente, muito provavelmente pela diminuição do gradiente térmico entre a temperatura superficial da pele (sob as penas desta região) e a temperatura ambiente (Figura 2.B).

A região proximal do bico dos tucanos apresentou valores pouco diferentes aos obtidos durante o resfriamento. No início do experimento, a 10°C, o diferencial térmico entre esta região e a temperatura ambiente foi de 5,88°C ( $\pm 0,55$ ). Com o início do aquecimento, houve nítido incremento do diferencial térmico para temperaturas acima de 22°C (ver Figura 2.C), indicando a ocorrência de ajustes vasomotores nestas temperaturas. Os diferenciais térmicos obtidos nas três temperaturas anteriores ao início destes ajustes diferiram significativamente ( $P <$

0,0002) daqueles encontrados nos três pontos (temperaturas) após tais ajustes (ver Tabela 2). Não houve diferença significativa entre as 3 temperaturas antes ou após os ajustes vasomotores quando comparados entre si ( $P < 0,962$ ).

A região distal do bico do tucano manteve um diferencial térmico entre a temperatura superficial do bico e a temperatura ambiente de apenas  $0,91^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,97$ ) a  $10^{\circ}\text{C}$ . O diferencial térmico aumentou progressivamente com o incremento da temperatura ambiente a partir dos  $23^{\circ}\text{C}$  (Figura 2.D). Desta forma, os diferenciais térmicos obtidos nas temperaturas anteriores ao início dos ajustes (três pontos) diferiram significativamente ( $P < 0,00001$ ) daqueles encontrados nas (três) temperaturas após os ajustes vasomotores (ver Tabela 2). Não houve diferença significativa entre os três pontos antes ou após os ajustes vasomotores quando comparados entre si ( $P < 0,985$ ). Assim, como observado também durante o resfriamento e talvez pelos mesmos motivos, a resposta vasomotora da região distal do bico foi consideravelmente mais evidente do que àquela observada para a região proximal.

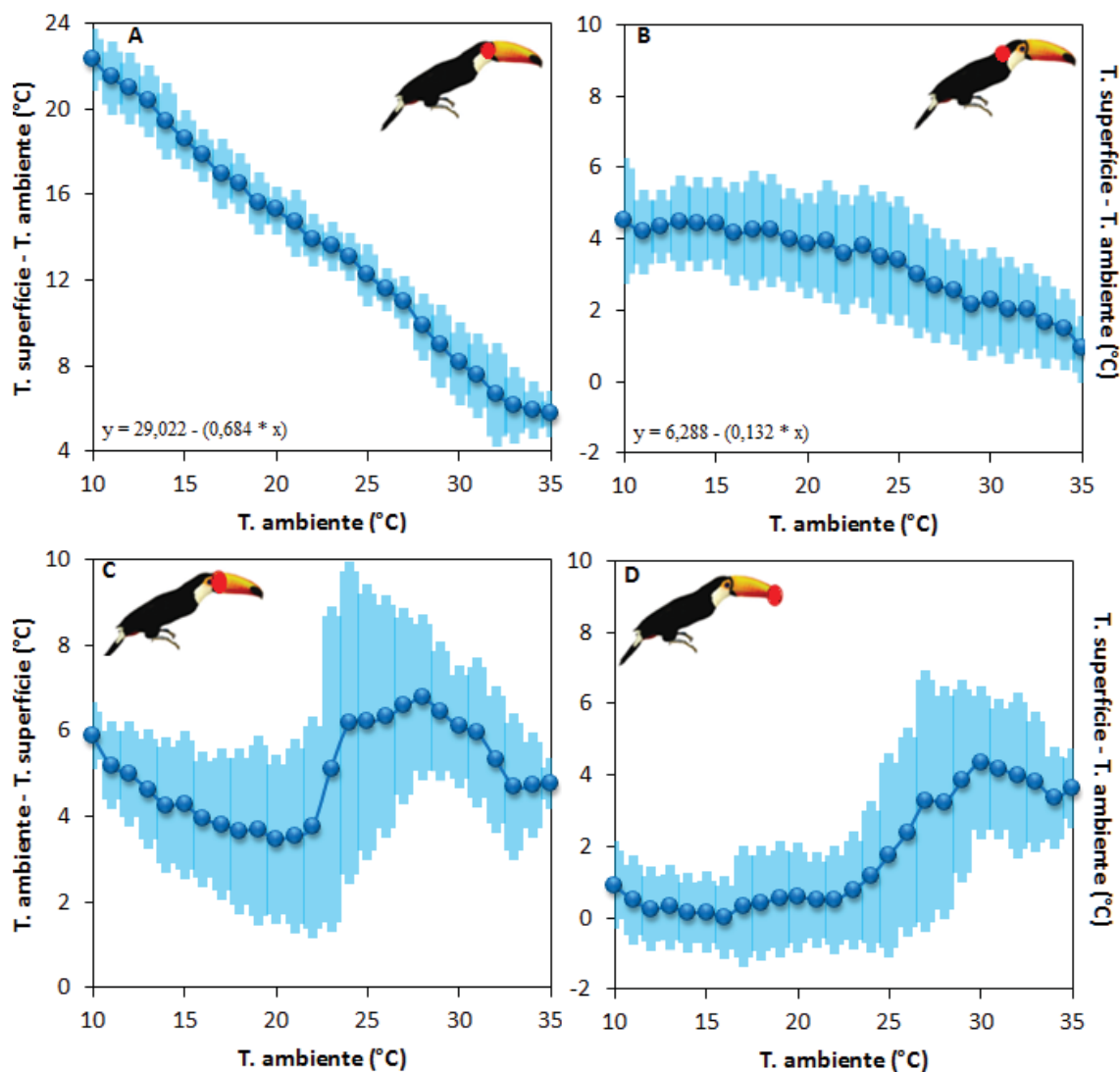


Figura 2. Diferença entre a temperatura da superfície dos tucanos, *Ramphastos toco*, e a temperatura ambiente em resposta a um aumento da temperatura de 10°C para 35°C. O gráfico 2. **A** refere-se a região dos olhos, o 2. **B** a região das penas, o 2. **C** a região proximal do bico e o 2. **D** a região distal do bico. Símbolos indicam valores médios e área sombreada de azul indica Desvio Padrão.

Tabela 2. Diferencial térmico ( $\Delta T = T. \text{sup} - T. \text{amb}$ ) entre a temperatura superficial média da região proximal e distal do bico de *R. Toco* (n=8) e a temperatura ambiente antes (20 a 22°C) e após (24 e 26°C; 29 a 31°C) a ocorrência dos ajustes vasomotores.

|                 | T. ambiente (°C) | $\Delta T = T. \text{sup} - T. \text{amb}$ (°C) |
|-----------------|------------------|-------------------------------------------------|
| Região proximal | 20 a 22°C        | 3,5°C $\pm$ 1,9                                 |
|                 | 24 a 26°C        | 6,2°C $\pm$ 2,9                                 |
| Região distal   | 20 a 22°C        | 0,5°C $\pm$ 1,1                                 |
|                 | 29 a 31°C        | 4,1°C $\pm$ 2,0                                 |

### **3.2 - Variações agudas da temperatura ambiente**

#### **3.2.1. Resfriamento**

A transferência imediata dos tucanos de uma câmara quente (35°C) para outra fria (10°C) causou ajustes rápidos e importantes da temperatura superficial da ave.

O diferencial térmico entre a temperatura superficial da região dos olhos e a temperatura ambiente, elevada no início do experimento (média = 28,37°C), manteve-se praticamente constante ao longo do experimento (média = 21,5°C ± 1,68, ao fim do experimento) (Figura 3.A) indicando a ausência de qualquer ajuste vasomotor com manutenção da irrigação sangüínea desta região alta e constante.

O diferencial térmico entre a região das penas e a temperatura ambiente, de inicialmente de 18,27°C, caiu rapidamente ao longo dos primeiros minutos do experimento e, a partir daí, manteve-se relativamente constante em torno de 4°C ao longo do tempo (ver figura 3. B). Esta observação ilustra a alta velocidade com que as penas entraram em equilíbrio térmico com a nova situação e a ausência de qualquer regulação importante do fluxo de calor através desta superfície.

O diferencial térmico entre a região proximal do bico e a temperatura ambiente, alto no início do experimento (27°C ± 0,45), diminuiu de maneira muito rápida, alcançando um diferencial de 6,9°C (±1,24) ao final do experimento (Figura 3. C). A diminuição do diferencial térmico ocorreu de forma não linear (ver Tabela 3), com 90% da variação total ocorrendo nos primeiros 15 minutos de experimento.

O diferencial térmico entre a superfície da região distal do bico e a temperatura ambiente também alto no início dos experimentos (27°C ± 0,45) diminuiu drástica e rapidamente alcançando valores ainda menores (média=1,32°C ±1,43) do que àqueles observados para a região proximal do bico. A diminuição do diferencial térmico para a região distal do bico também ocorreu de forma não linear (Tabela 3), com 90% da variação ocorrendo nos 12 minutos iniciais do experimento.

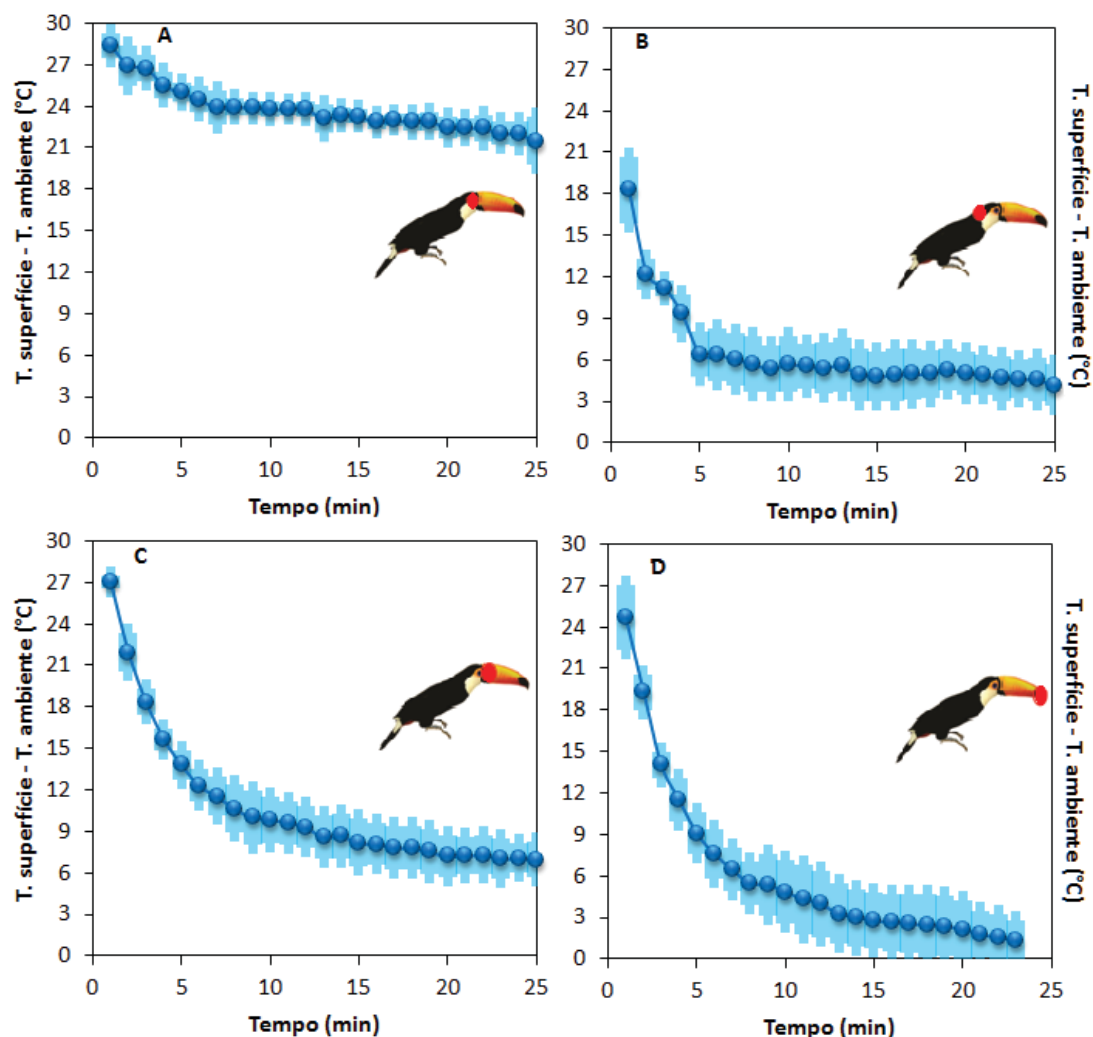


Figura 3. Diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do ambiente do tucano, *Ramphastos toco*, submetido à uma variação aguda da temperatura ambiente de  $35^{\circ}\text{C}$  para  $10^{\circ}\text{C}$ . O gráfico **3. A** refere-se a região dos olhos, o **3. B** a região das penas, o **3. C** a região proximal do bico e o **3. D** a região distal do bico. Símbolos indicam valores médios e área sombreada de azul indica Desvio Padrão.

Tabela 3. Valores estatísticos da regressão não-linear ( $f=y_0+(a/x)$ ) entre o diferencial da temperatura superficial das diferentes regiões do bico e a temperatura ambiente e o tempo de exposição em *R. toco* ( $n = 8$ ) quando submetidos ao resfriamento agudo ( $35 \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$ ).

|                 | Adj Rsqr | DF  | F      | P        |
|-----------------|----------|-----|--------|----------|
| Região Proximal | 0,8255   | 162 | 767,45 | < 0,0001 |
| Região distal   | 0,8063   | 178 | 741,9  | < 0,0001 |

### 3.2.2. Aquecimento

A exposição do tucano a uma variação aguda da temperatura corpórea, de 10°C para 35°C, foi acompanhada de alterações da temperatura superficial da ave, em sentido contrário, muito similares às aquelas notadas durante o resfriamento.

O diferencial térmico entre a região dos olhos e temperatura ambiente novamente apresentou muito pouca variação ao longo do tempo. No primeiro minuto a região dos olhos, que estava a uma temperatura próxima de 33°C, apresentou um diferencial com a temperatura ambiente de -1,87°C. Houve um incremento de 1,52°C até segundo minuto de experimento e, a partir daí uma estabilização dos valores em torno de 5°C (Figura 4. A). A região das penas equilibrou-se com a temperatura ambiente no quinto minuto de exposição à nova temperatura (35°C) mantendo, a partir daí, um diferencial térmico próximo de 0°C (Figura 4. B). Como comentado anteriormente, em ambos os casos evidencia-se a ausência de ajustes no fluxo de calor. A superfície da região dos olhos é mantida permanentemente quente pela irrigação sangüínea elevada e constante independente da temperatura ambiente, ao passo que a temperatura das penas acompanha passivamente a variação da temperatura ambiente.

A região proximal do bico, que estava 19,8°C ( $\pm 0,88$ ) abaixo da temperatura ambiente no início do experimento sofreu uma diminuição do diferencial térmico de forma não linear (Tabela 3), com 90% da resposta vasomotora ocorrendo nos 12 minutos iniciais do experimento, momento no qual o diferencial térmico havia caído para próximo de 4°C (Figura 4. C). A região distal do bico, inicialmente 20,5°C ( $\pm 1,27$ ) abaixo da temperatura ambiente, também apresentou uma redução bastante rápida do diferencial térmico, com 90% dos ajustes vasomotores ocorrendo nos 13 minutos iniciais do experimento (Figura 4. D).



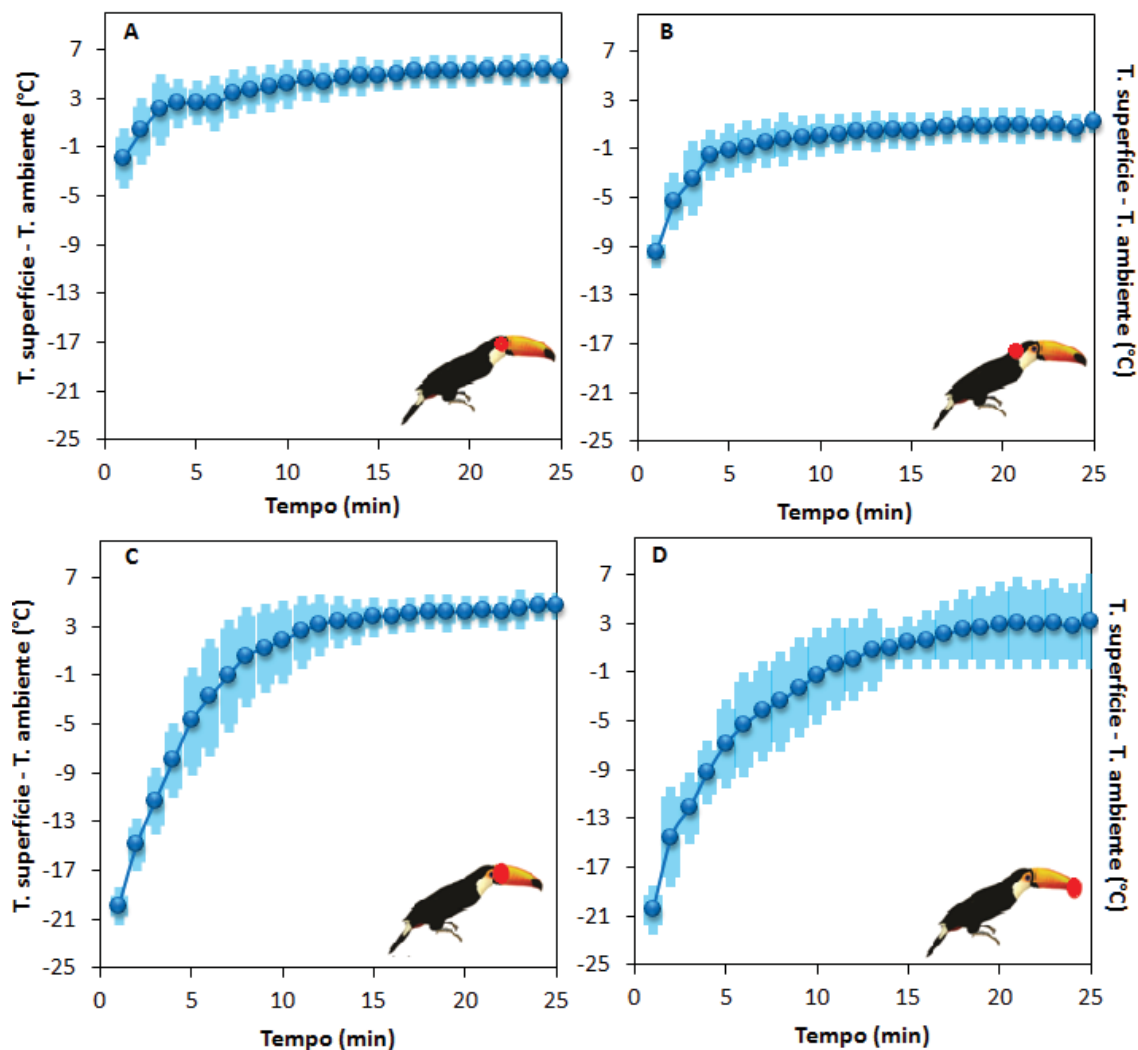


Figura 4. Diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do ambiente do tucano, *Ramphastos toco*, submetido à uma variação aguda da temperatura ambiente de  $10^{\circ}\text{C}$  para  $35^{\circ}\text{C}$ . O gráfico 4. **A** refere-se a região dos olhos, o 4. **B** a região das penas, o 4. **C** a região proximal do bico e o 4. **D** a região distal do bico. Símbolos indicam valores médios e área sombreada de azul indica Desvio Padrão.

Tabela 4. Os dados reportados referem-se à regressão não-linear ( $f=y_0+(a/x)$ ) resultante da relação entre o diferencial da temperatura superficial do animal e a ambiente e o tempo decorrido de experimento, durante a submissão do *R. toco* ( $n = 8$  indivíduos) a uma temperatura de  $35^{\circ}\text{C}$  no interior da câmara climática. Corrigir como a anterior

|                 | Adj Rsqr | DF  | F      | P        |
|-----------------|----------|-----|--------|----------|
| Região Proximal | 0,7551   | 173 | 534,47 | < 0,0001 |
| Região distal   | 0,707    | 176 | 425,66 | < 0,0001 |

### 3.3. Dissipação de calor metabólico

A realização do exercício (vôo) aumenta as taxas de produção de calor metabólico que, em minutos, leva ao aumento da temperatura superficial do bico. Em nosso estudo, as alterações na temperatura superficial do bico em resposta ao exercício foram expressas como diferencial térmico entre a temperatura superficial das regiões proximal e distal do bico e a temperatura ambiente ( $\Delta T = T_s - T_{amb}$ ), em função do período de duração do exercício realizado (que totalizou 8 minutos). Todos os experimentos foram realizados no período da manhã, entre 06:00 h e 08:00 h. A temperatura ambiente média durante os dias de experimentação foi de 17,5°C ( $\pm 3,87$ ).

A temperatura superficial da região proximal do bico, inicialmente em 18,8°C ( $\pm 3,0$ ), sofreu um incremento de 15,9°C, ao longo dos 8 minutos de experimentação. Já a temperatura superficial da região distal do bico, inicialmente em 17,7°C ( $\pm 3,7$ ), foi elevada para 31,8°C ao final dos 8 minutos de experimentação (Figura 5). Os ajustes vasomotores associados ao voo e, conseqüentemente ao aumento da produção de calor metabólico, ocorreram principalmente na primeira metade do experimento, no qual cerca de 70% do aumento total da temperatura superficial do bico já havia ocorrido.

A variação da temperatura superficial do bico de *R. toco* associada ao voo encontrada por nós foi consideravelmente maior (cerca de duas vezes) do que aquela encontrada por Tattersall et al. (2009). Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que no experimento realizado por estes autores, a temperatura superficial do bico já se encontrava bem elevada no início do experimento (30°C) e, portanto, não sofreu grande incremento até o término do exercício. De qualquer forma, os resultados aqui reportados corroboram a noção de que o bico do tucanuçu constitui uma via de grande relevância para promover a dissipação do calor metabólico, especialmente sob condições nas quais a taxa metabólica é elevada.

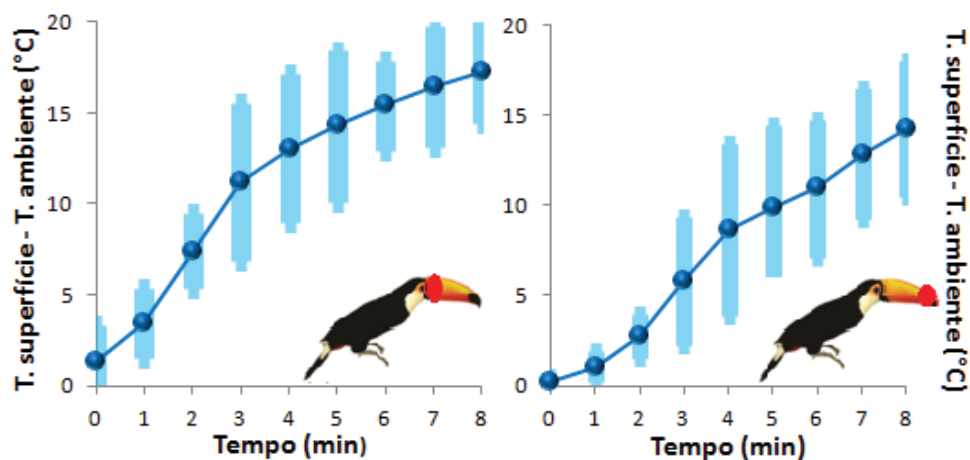


Figura 5. Diferencial entre a temperatura superficial das regiões proximal e distal do bico de *R. toco* ( $n = 4$  indivíduos) e a temperatura ambiente no decorrer de 8 minutos de realização de exercício (vôo). Símbolos indicam valores médios e área sombreada de azul indica Desvio Padrão.

### 3.4. – O papel das patas na troca de calor

Durante os experimentos as aves permaneceram empoleiradas e, nesta posição, geralmente expunham apenas a região inferior do metatarso, já que a porção superior deste permanecia coberta pelas penas do ventre da ave. As patas, por sua vez, permaneceram expostas apenas em sua face superior já que a região inferior permaneceu aderida ao poleiro. Em geral, a variação da temperatura superficial das patas, esquerda e direita, frente às alterações na temperatura ambiente foi muito semelhante e, portanto, estes dados foram agrupados nas análises posteriores. Os dados de temperatura superficial das patas foram comparados com os dados de temperatura superficial do bico, das penas e dos olhos do tucano, os quais foram apresentados no item 3.1.

#### 3.4.1 – Resfriamento

No início do experimento, a 35°C, a superfície das patas do tucano-toco apresentou uma temperatura elevada, por volta de 39°C (Figura 6). No início da diminuição da temperatura ambiente, a região das patas e o bico apresentaram diferencial térmico muito semelhante, indicando que, em termos de gradiente para dissipação de calor, ambas as regiões apresentavam o mesmo potencial (Figura 6).

Portanto, as contribuições do bico e das patas nestas temperaturas elevadas diferiram fundamentalmente em virtude da maior área superficial do bico (ver discussão abaixo). No entanto, em temperaturas abaixo de 31°C, notamos que começa ocorrer uma modulação da temperatura superficial do bico. Na região distal, especialmente, há uma queda quase que contínua do diferencial térmico conforme a temperatura ambiente diminui de 30 até cerca de 15°C. Já na região proximal do bico, há uma clara diminuição do gradiente térmico por volta dos 22°C (Figura 6). Assim, é possível perceber de forma inequívoca que ajustes vasomotores subjacentes restringem a circulação do sangue para a região do bico de forma a diminuir o gradiente térmico e, com isso, diminuir a dissipação de calor para o ambiente em uma situação de diminuição da temperatura ambiente.

Por outro lado, a região das patas permaneceu aquecida até temperaturas ao redor de 20°C, o que implica em um aumento do diferencial térmico conforme a temperatura ambiente declina (Figura 6). Apenas em temperaturas mais frias (< 20°C), observamos uma paulatina diminuição do diferencial térmico das patas. Nestas condições, porém, é incerto se a diminuição do diferencial térmico estaria relacionada a um ajuste vasomotor ativo restringindo a circulação para esta área, a exemplo do que ocorre com a região do bico, ou se o simples resfriamento do ambiente poderia estar causando uma diminuição da temperatura dos tecidos superficiais da pata, os quais são bastante cornificados, mesmo na ausência de um ajuste vasomotor local.

### 3.4.2 - Aquecimento

No início do experimento, a 10°C, a região das patas apresentou uma temperatura superficial bem próxima do ambiente (ver Figura 6). Nestas condições a perda de calor para o meio através das patas, assim como observado para o bico, é bastante reduzida. Posteriormente, com a elevação da temperatura ambiente é possível identificar, próximo dos 22°C, indícios de uma vasodilatação e aumento do fluxo sanguíneo para a região proximal do bico, responsáveis por um claro aumento do diferencial térmico. Na região distal do bico, os ajustes vasomotores iniciam-se ao redor dos 22°C e estendem-se até temperaturas próximas dos 30°C aumentando, de

maneira um pouco menos marcante do que notada para a região proximal, o diferencial térmico entre essa região e o ambiente.

Por outro lado, a região das patas apresentou temperaturas superficiais abaixo da temperatura ambiente durante quase todo o experimento, o que resultou no aumento do gradiente térmico entre essa região e o ambiente até temperaturas próximas aos 25°C. A partir dessa temperatura e até os 31°C, nota-se uma redução gradativa no diferencial térmico entre as patas e o ambiente, devido ao aumento da temperatura superficial das patas. Este aumento, no entanto, ocorre de maneira paulatina e sem a modulação tipicamente observada para as regiões do bico. Desta forma, suspeitamos que as mudanças na temperatura superficial das patas, neste intervalo de temperaturas (25 – 31°C), possam ter sido causadas, pelo menos parcialmente, pelo simples aquecimento passivo dos tecidos superficiais das patas em virtude do aumento da temperatura ambiente. No entanto, quando a temperatura ambiente foi elevada ainda mais, acima de 31°C, observamos um aumento súbito do diferencial térmico das patas possivelmente indicando um aumento, ainda que moderado, do fluxo sanguíneo para os tecidos desta região (Figura 6).

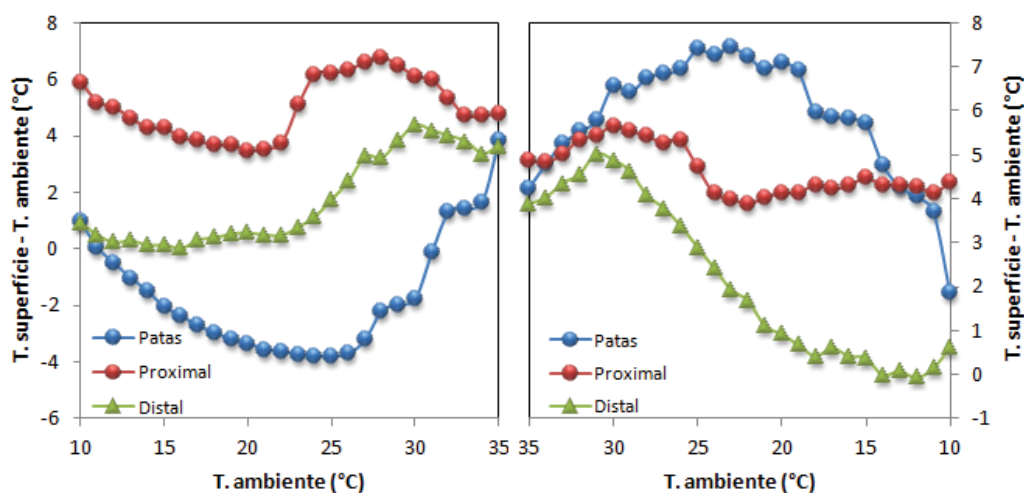


Figura 6. Variação na média do diferencial térmico entre a temperatura ambiente e as temperaturas superficiais do bico (região proximal e distal) e patas do tucano, *Ramphastos toco*, em resposta a variação da temperatura ambiente.

Portanto, nossos resultados corroboram a noção de que bico do tucanuçu atua como uma eficiente janela térmica capaz de promover dissipação de calor,

quando a temperatura ambiente é elevada ou a conservação de calor quando a temperatura ambiente diminui (ver Tattersall *et al*, 2009) acrescentando que estes ajustes podem ocorrer de maneira bastante rápida e dinâmica. Encontramos também que as patas, reconhecidas como importante via de troca de calor em outras espécies de aves, tiveram pouca relevância quanto a este aspecto em *R. toco*. Embora em grande parte estes resultados reflitam diferenças na área superficial destas duas vias (ver Discussão a seguir), nossos resultados também indicam que a regulação dos ajustes vasomotores associados à conservação/dissipação de calor ocorrem de forma mais rápida e precisa para as regiões do bico em comparação com as patas.

### 3.5 – Análise Quantitativa da Troca de calor

A partir dos dados morfométricos (ver Tabela 5) e da temperatura superficial, nós quantificamos o calor passível de ser dissipado através do bico e das patas do tucano-toco durante a sua exposição à variações rápidas da temperatura ambiente entre 10°C e 35°C (Séries Experimentais 3.1 e 3.4).

Durante o aquecimento, de 10°C para 35°C, o bico sempre apresentou temperaturas superficiais mais elevadas do que as patas, o que implicou em um maior gradiente térmico e, conseqüentemente, um maior potencial para perda de calor através desta região (Figura 7). Observação especialmente verdadeira quando associada à diferença em área superficial, consideravelmente maior para o bico do que para as patas (Tabela 5). Em especial, é absolutamente clara a modulação da troca de calor através do bico em função do aumento na temperatura ambiente. Por volta de 22°C, ocorre um aumento marcante do gradiente térmico na região do bico, o que promove o aumento da troca total de calor de cerca de 1,9 W para 4,6 W. Sob estas condições, o bico, sozinho, pode responder por até 73% do total de calor dissipado por *R. toco* (Figura 8).

Durante o resfriamento da temperatura ambiente, o bico do tucano apresentou temperatura superficial abaixo daquela apresentada pelas patas durante quase todo o experimento. A perda de calor para o ambiente através do bico caiu de 3,1W para 1,4 W e, novamente, esta queda foi associada à ocorrência de ajustes vasomotores subjacentes claramente percebidos ao redor da temperatura ambiente

de 22°C. Já a região das patas não exibiu a mesma resposta. O gradiente térmico entre as patas e o ambiente manteve-se elevado até temperaturas próximas de 22°C e, só após este ponto, começou a diminuir lentamente. Isto provocou o aumento da perda de calor pelas patas para um valor máximo de 1,2 W por volta dos 22°C de temperatura ambiente (Figura 7). Nestas condições, as patas foram responsáveis por 23,5% da perda de calor total para o ambiente praticamente igualando-se a troca de calor pelo bico, a despeito da enorme diferença de área superficial entre as duas regiões (Figura 8). Esta resposta ilustra a relevância da modulação do gradiente térmico, através dos ajustes vasomotores subjacentes, para a homeostase térmica das aves. Como observado durante o aquecimento, a variação da temperatura superficial dos tecidos das patas ocorreu de forma lenta e regular evidenciando a inexistência, ou limitação severa, de ajustes vasomotores importantes, como aqueles observados para o bico. Desta forma, pelo menos parcialmente, parte das alterações da temperatura superficial das patas podem se dever ao simples aquecimento/resfriamento passivo dos tecidos superficiais destes apêndices em virtude da variação da temperatura ambiente.

Tabela 5. Medidas morfométricas tomadas de adultos de *Ramphastos toco* (n=7).

|              |                                                | Média ± desvio<br>padrão |
|--------------|------------------------------------------------|--------------------------|
| <b>Bico</b>  | Comprimento do bico (cm)                       | 17,1 ± 1,6               |
|              | Altura do bico (cm)                            | 6,6 ± 0,3                |
|              | Largura do bico (cm)                           | 2,8 ± 0,1                |
|              | Área do bico (cm <sup>2</sup> )                | 194,8 ± 51,0             |
| <b>Patas</b> | Área total das patas (cm <sup>2</sup> )        | 32,3 ± 3,4               |
| <b>Corpo</b> | Área da superfície corporal (cm <sup>2</sup> ) | 605,3 ± 23,0             |
|              | Massa corpórea (g)                             | 643,2 ± 41,0             |

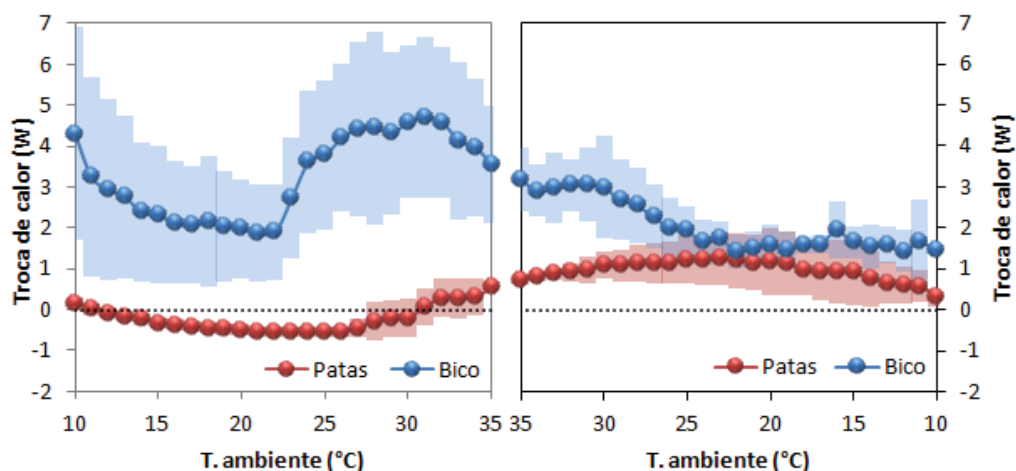


Figura 7. Troca de calor (em watts) através da superfície do bico e das patas do Tucano-toco (*Ramphastos toco*) em função da temperatura ambiente, assumindo-se uma velocidade do vento de 5 m.s<sup>-1</sup>. Símbolos e áreas sombreadas representam média e desvio padrão, respectivamente.

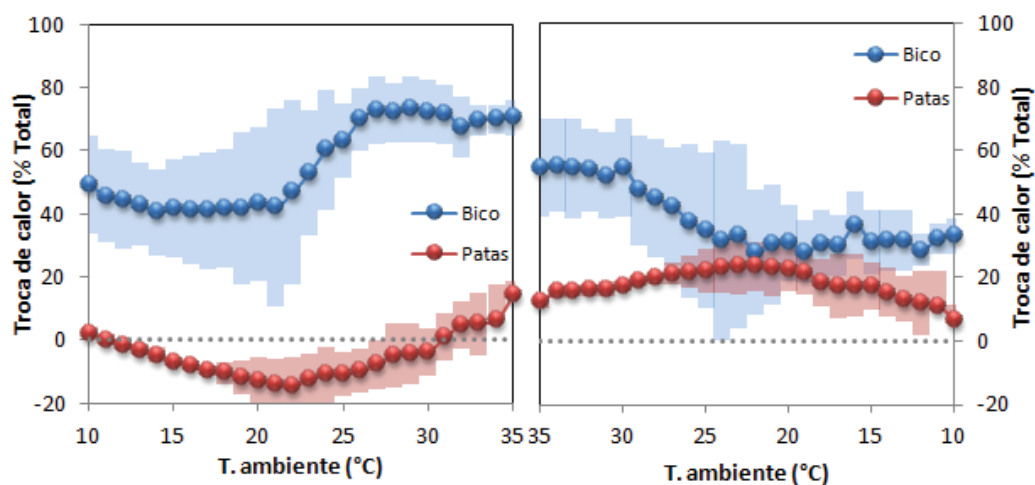


Figura 8. Troca de calor através do bico e das patas do tucano-toco expressada como porcentagem do total de calor trocado com o ambiente através de toda a superfície corpórea. Símbolos e áreas sombreadas representam média e desvio padrão, respectivamente.

#### 4) CONCLUSÃO

Em suma, nossos resultados confirmam que os tucanos são capazes de modular a temperatura superficial do bico e, portanto, a quantidade de calor



dissipada para o ambiente. Estes ajustes ocorrem de maneira bastante rápida, em minutos, o que indica o envolvimento de um controle neural subjacente aos ajustes vasomotores e podem ser desencadeados tanto em resposta a variações da temperatura ambiente, rápidas ou agudas, bem como devido à elevação da temperatura corpórea devido ao exercício.

A regulação da troca de calor através das patas de *R. toco* parece ser inexistente ou muito limitada. Não é possível identificar faixas de temperatura onde eventos claros de ajuste vasomotor estejam ocorrendo, diferentemente do que é observado para o bico. Assim, suspeitamos que parte substancial das variações da temperatura superficial dos tecidos das patas podem se dever a um resfriamento/aquecimento passivo destes tecidos em virtude das variações da temperatura ambiente. Reforça esta noção a variação lenta e regular da troca de calor através das patas (ver Figuras 7 e 8).

Ainda que em algumas situações as patas do tucano-toco atinjam temperaturas superficiais próximas àquelas observadas para o bico, sua contribuição para o balanço térmico global das aves é pouco relevante. O que está diretamente relacionado às diferenças entre área superficial, consideravelmente maior para o bico e, possivelmente, à diferenças na capacidade de regulação vasomotora já mencionada.

Os fatores que influenciam as trocas de calor com ambiente são: a área superficial, o isolamento térmico e a possibilidade de ajuste vasomotor local (WILLIAMS, 1990). No caso das aves, as principais regiões que reúnem estas características permitindo a modulação das trocas de calor, são as patas e o bico, além de algumas regiões do corpo com a cobertura de penas reduzida. Em pombos, por exemplo, Martineau e Laroche (1988), observaram que as patas constituem uma importante via para troca de calor. Em patos selvagens (*Anas platyrhynchos*), que frequentemente permanecem com as patas submersas, a troca de calor através desta região assume especial relevância para a homeostase térmica do animal (KILGORE & SCHMIDT-NIELSEN, 1975). A participação das patas e, principalmente, do bico para a troca de calor com o ambiente em aves parece ser bastante relevante tanto que seus tamanhos relativos parecem possuir um padrão global de variação em função da latitude (SYMONDS & TATTERSALL, 2010). Em uma comparação interespecífica bastante sólida, esses autores encontraram que o tamanho relativo do bico diminui com o aumento da latitude e altitude e consequente

diminuição da temperatura ambiente. No caso específico do tucano toco, é possível que o aumento do bico, cujo fator causal adaptativo permanece desconhecido, tenha resultado na aquisição de uma maior relevância deste apêndice para a homeostase térmica desta ave com a consequente diminuição em importância das patas.

## 5)REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, H. **Toucans of the Americas**. Rio de Janeiro Brazil: M. Pontual Edições e Arte, 2004.

AUSTIN, O.L. **Birds of the World**. New York: Golden Press, 1983.

BANTA M.R, LYNOTT A.J, VANSANT M.J, BAKKEN G.S. Partitioning heat loss from mallard ducklings swimming on the air–water interface. **Journal of Experimental Biology** 207, p. 4551–4557, 2004.

BUHLER, P. The visual peculiarities of the toucan's bill and their principal biological role (Ramphastidae, Aves). In: ULRICH, H. (Ed) **Tropical Biodiversity and Systematics**. Zoologisches Forschung Institut und Museum, Bonn, Germany, p. 305–310, 1997).

DAWSON, W.R. & WHITTOW, G.C. Regulation of Body Temperature. In: Whittow, G. C. **Turkie's, Avian Physiology**. 5<sup>th</sup> ed. Academic Press. San Diego, USA, p. 343-390, 2000.

HAGAN, A. A. & HEATH, J. E. Regulation of heat loss in the duck by vasomotion in the bill. **Journal of Thermal Biology**. 5, p. 95 -101, 1980.

HILL, R.W., CHRISTIAN, D. P., VEGHTE, J.H. Pinna temperature in exercising jackrabbits, *Lepus californicus*. **Journal of Mammalogy**. 61, p. 30-38, 1980.

HILL R.W., WYSE G.A., ANDERSON M. **Animal Physiology**. Sunderland (MA): Sinauer Associates, 2004

IRVING, L. & KROG, J. Temperature of skin in the arctic as a regulator of heat. **Journal of Applied Physiology**. 7, p. 355-364, 1955.

JOHANSEN, K., & R. W. MILLARD. Vascular responses to temperature in the foot of the giant fulmar, *Macronectes giganteus*. **Journal of Comparative Physiology** 85, p. 47–64, 1973.

JONES. J.S.. Evolution: The point of a toucan's bill. **Nature**, 315, p. 182, 1985.

KILGORE, D. L. & SCHMIDT-NIELSEN, K. Heat loss from duck's feet immersed in cold water. **Condor**, 77, p. 475-478, 1975.

KLUGER, M.J. & HEATH, J.E. Vasomotion in the bat wing: a thermoregulatory response to internal heating. **Comparative Biochemistry and Physiology**, 32, p. 219-226, 1970.

MARTINEAU, L. & LAROCHELLE, J. The cooling power of pigeon legs. **Journal of Experimental Biology**. 136, p. 193-208, 1988.

MOYES, C.D., SCHULT, P.M. **Principles of Animal Physiology**. New York: Benjamin Cummings Publishing Company; 2008.

PHILLIPS, P.K., HEATH, J.E. Heat exchange by the pinna of the African elephant (*Loxodonta Africana*). **Comparative Biochemistry and Physiology**. 101 (4), p. 693-699, 1992.

PHILLIPS, P. K. & SANBORN, A. F. An infrared thermographic study of surface temperature in three ratites: ostrich, emu and double-wattled cassowary. **Journal of Thermal Biology**. 19, p. 423–430, 1994.

RAMAN, E.R., ROBERTS, M.F., VANHUYSE V.J. Body temperature control of rat tail blood flow. **American Journal of Physiology**. 245: p. 426–432, 1983.

SICK, H. **Ornitologia Brasileira: uma Introdução**. Brasília: Universidade de Brasília. v. 2. 1986.

STEEN, I., & J. B. STEEN. The importance of the legs in the thermoregulation of birds. **Acta Physiologica Scandinavica** 63: p. 285– 291, 1965.

STITT, J. T. The regulation of respiratory evaporative heat loss in the rabbit. **Journal of Physiology**. 258, p. 157-171, 1976.

SYMONDS, M. R. E. & TATTERSALL, G. J. Geographical variation in bill size across bird species provides evidence for Allen's rule. **American Naturalist**. 176: p. 188 – 197, 2010.

TATTERSALL, G.J., ANDRADE, D.V., & ABE, A.S. Heat exchange from the toucan bill reveals a controllable vascular thermal radiator. **Science**, 325, p. 468 – 470, 2009.

TATTERSALL, G. J., MILSOM, W. K., ABE, A. S., BRITO, S. P. and ANDRADE, D. V. The thermogenesis of digestion in rattlesnakes. **Journal of Experimental Biology**. 207, p. 579 -585, 2004.

TRAILL, T. S. Some observations on the bill of the toucan. In: **a letter to the Right Hon. Sir Joseph Banks, Bart.** Transactions of the Linnean Society of London, 11: p. 288-289, 1815.

WEST-EBERHARD, M.J. Sexual selection, social competition, and speciation, **Quarterly Review of Biology**, 58, p. 155–83, 1987.

WILLIAMS, T. M. Heat transfer in elephants: thermal partitioning based on skin temperature profiles. **Journal of Zoology** (London), 222, p. 235 -245, 1990.

WILLMER, P., G. STONE, JOHNSTON, I. **Environmental physiology of animals**. Blackwell Science, Oxford. 2000.

WITHERS, J.B. **Comparative Animal Physiology**. Saunders College, Fort Worth, Texas, 1992.

---

Denis Vieira de Andrade

---

Jussara Nascimento Chaves