



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA

Emanuel Messias Lima da Silva

**Uso do habitat e dieta de canário-da-terra (*Sicalis flaveola* Linnaeus, 1766) e sua
relação com a expressão da coloração ornamental da plumagem**

Brasília - DF
2024



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA

Emanuel Messias Lima da Silva

**Uso do habitat e dieta de canário-da-terra (*Sicalis flaveola* Linnaeus, 1766) e sua
relação com a expressão da coloração ornamental da plumagem**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Ecologia da Universidade de Brasília, para a obtenção do
título de Mestre em Ecologia

Orientadora: Profa. Dra. Gabriela Bielefeld Nardoto

Brasília - DF
2024



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA

Emanuel Messias Lima da Silva

**Uso do habitat e dieta de canário-da-terra (*Sicalis flaveola* Linnaeus, 1766) e sua
relação com a expressão da coloração ornamental da plumagem**

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Gabriela Bielefeld Nardoto/ PPG-ECL – UnB (Presidente/Orientadora)

Prof. Dr. Pedro Diniz Alves/ PPG-ECL – UnB (Membro Titular)

Prof. Dr. Luciano Nicolás Naka/ PPGE_{TNO} – UFPE (Membro Titular)

Prof. Dr. Miguel Ângelo Marini/ PPG-ECL – UnB (Membro Suplente)

Brasília – DF
2024

“Se os seus sonhos inacabáveis guiam os seus caminhos,
lute para que eles virem realidade sob a bandeira de seus ideais!”

(Gol D. Roges / One Piece)

AGRADECIMENTOS

À professora Dra. Gabriela B. Nardoto por ser uma excelente orientadora e por toda a oportunidade, ensinamentos compartilhados e pela parceria que vem desde a minha graduação. Não posso deixar de agradecer também por sua paciência, compreensão e amizade ao longo desse proveitoso caminho de aprendizagem.

Ao Dr. Fábio Costa, por todo o ensinamento compartilhado e por todas as enriquecidas discussões que tivemos ao longo deste projeto, além de toda a paciência, compreensão e amizade.

Ao professor Dr. Felipe Gawryszewski pelo empréstimo do espectrofotômetro para as análises colorimétricas realizadas no presente trabalho, mas também por sua contribuição intelectual para com o desenvolvimento da presente dissertação.

Ao professor Dr. Osmindo Pires Junior pelo conhecimento compartilhado sobre a bioquímica dos carotenoides, e por toda disponibilidade de me acompanhar nas tentativas de extração dos carotenoides das penas.

Aos meus queridos amigos e colegas do EIS pelos diversos momentos de alegria, descontração, mas também de compartilhamento de conhecimento através de ricas discussões de variados dos mais variados temas, que muitas vezes não se centrava apenas ao presente projeto, mas também aos seus respectivos projetos. Sem esses ótimos momentos ao lado do Eduardo Bernades, Eduardo Santos, Gilmar Filho, Ingrid de Mattos, Jeferson, Luiza Campos, Luiza Brasileiro e Vinicius Pompemaier essa trajetória seria bastante enfadonha.

Aos meus queridos amigos que fiz ao longo deste período, muitas amizades construídas através das enriquecidas disciplinas, mas também nos clássicos cafés da tarde que contribuíram significativamente no caminhar do projeto, um grande abraço à Alexandra Martins, Amanda Vasconcelos, Ana Claudia, Daniel Daldegan, Guilherme Sena, Isabela Castro, Jeferson Brendon, Laura Barreto, Sofia Coradini e Yara Ballarini.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade de Brasília pelos ensinamentos compartilhados e pela dedicação exercida para tornar e manter a excelência do curso, bem como ao departamento de Ecologia da UnB pela estrutura disponibilizada para realização do trabalho.

Aos trabalhadores da Universidade de Brasília, que zelam e sustentam as estruturas deste local que aos poucos se torna um espaço de amplo conhecimento e não de privilégios.

Ao pessoal da Fazenda Tabapuã dos Pireneus que, além de disponibilizar a área para as todas as campanhas de campo, contribuíram no reconhecimento das áreas de coleta.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida (processo 88887.667541/2022-00) e pelo recurso fornecido através do projeto Origem; Edital Capes Pró-forense/2014 (processo 23038.006832/2014-11).

Por fim, agradeço imensamente a Luzia Rosanira (Ni), minha mãe e eterna referência que enquanto em vida, foi minha maior referência e me encorajando a nunca desistir dos nossos sonhos e objetivos, pessoa a qual dedico o presente trabalho. Do mesmo modo, um imenso agradecimento ao meu pai, Josailton Silva (Galo) que sempre me apoiou e buscou me motivar a percorrer os meus sonhos, sempre agindo para que nada faltasse.

SUMÁRIO

Resumo	i
Abstract	ii
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
1. Introdução	01
2. Objetivos e Hipóteses	07
2.1. Objetivos Específicos.....	07
2.2. Hipótese.....	07
3. Referencial Teórico	09
3.1. Sinalização e Coloração da Plumagem em Aves.....	09
3.2. Cor da Plumagem em Aves.....	10
3.3. Carotenoides e Coloração Ornamental.....	11
3.4. Uso de Isótopos Estáveis em estudos sobre dieta.....	14
3.5. Uso de Isótopos Estáveis em estudos sobre variação temporal da dieta.....	15
4. Material & Métodos	18
4.1. Área de Estudo.....	18
4.2. Espécie Estudada.....	19
4.3. Captura das Aves e Tecidos Amostrados.....	20
4.4. Análises Colorimétricas.....	23
4.5. Análises de Isótopos Estáveis.....	24
4.6. Análises Estatísticas.....	25
5. Resultados	27
5.1. Variação Temporal de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no Sangue de Indivíduos de Canário-da-terra.....	27
5.2. Variação Tecido – Tecido de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ de Indivíduos de Canário-da-terra.....	32
5.3. Espaço Isotópico e Sobreposição de Nicho.....	38
5.4. Relação entre Dieta e Coloração da Plumagem de Machos de Canário-da-terra.....	40
6. Discussão	44
6.1. Variação Temporal da Dieta e Diferenças do Forrageamento entre Classes de idade e sexo de Canário-da-terra.....	44
6.2. Coloração da plumagem de Machos de Canário-da-terra e a sua Relação com a dieta	47

7. Conclusão.....	51
8. Considerações Finais.....	52
9. Referências Bibliográficas.....	53

RESUMO

A ornamentação da plumagem à base de carotenoides recebe atenção notável porque os pigmentos carotenoides são adquiridos através da dieta. Isto levantou a ideia de que ornamentos à base de carotenoides poderiam representar um sinal fidedigno da capacidade de forragear, estado nutricional e saúde, uma vez que os carotenoides também são essenciais em processos fisiológicos. As classes de idade e sexo, que muitas vezes apresentam diferenças na coloração da plumagem, podem refletir diferenças na dieta. Aqui, utilizamos as razões isotópicas estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) para investigar como a dieta varia entre indivíduos do canário-da-terra (*Sicalis flaveola*) de diferentes classes de idade e sexo com base na habilidade de forrageamento ao longo do ano, e como a dieta dos machos amarelos é relacionada com a cor da plumagem. Um total de 195 indivíduos foi amostrado em sete campanhas de campo entre janeiro de 2017 e março de 2018. Os indivíduos foram classificados com base na cor da plumagem: fêmeas amarelas (i.e., fêmeas adultas com plumagem amarela), machos amarelos (i.e., machos adultos com plumagem amarela), e indivíduos pardos (i.e., juvenis e subadultos de ambos os sexos com plumagem parda). Sangue e diferentes penas foram coletados para análise de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$. Variáveis colorimétricas das penas da frente e peito de machos foram medidas para relacionar com os valores isotópicos. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do sangue foram semelhantes entre as categorias, indicando o predomínio do acesso a recursos basais C_4 ao longo do ano. Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ indicam que todas as categorias incorporam recursos alimentares de alto nível trófico. A diferença dos valores isotópicos entre as diferentes penas e sangue foram de inferior a 2‰ para $\delta^{13}\text{C}$ e 1‰ para o $\delta^{15}\text{N}$, como reflexo de uma discriminação tecidual a partir de uma dieta semelhante. O espaço isotópico de machos amarelos foi maior que as fêmeas amarelas e indivíduos pardos, indicando uma maior diversidade alimentar. A matiz mais laranja-avermelhada da frente de machos foi inversamente correlacionada com $\delta^{15}\text{N}$, indicando que esses carotenoides podem advir de fontes de alto nível trófico. Já a matiz mais amarelada-laranja do peito foi inversamente correlacionada com $\delta^{13}\text{C}$ e positivamente com $\delta^{15}\text{N}$, indicando que os carotenoides provêm de uma dieta mais diversificada, com sementes e artrópodes. O presente estudo mostra que a partição de recursos alimentares impulsionada pela competição tem um papel importante na condução da ornamentação à base de carotenoides entre classes de idade e sexos. Além de que os machos de canário-da-terra parecem adquirir os carotenoides de diferentes fontes alimentares, e modular sua deposição entre os ornamentos.

Palavras-chave: Carotenoides; Canário-da-terra; Coloração da plumagem; Habilidade no forrageamento; Isótopos Estáveis; *Sicalis flaveola*.

ABSTRACT

The ornamentation of plumage based on carotenoids receives notable attention because carotenoid pigments are acquired through diet. This has raised the idea that carotenoid-based ornaments could represent a reliable signal of foraging ability, nutritional status, and health, as carotenoids are also essential in physiological processes. Age and sex classes, which often exhibit differences in plumage coloration, may reflect differences in diet. Here, we used stable isotopic ratios of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) to investigate how diet varies among individuals of the Saffron Finch (*Sicalis flaveola*) from different age and sex classes based on foraging ability throughout the year and how the diet of yellow males is related to plumage color. A total of 195 individuals were sampled in seven field campaigns between January 2017 and March 2018. Individuals were classified based on plumage color: yellow females (i.e., adult females with yellow plumage), yellow males (i.e., adult males with yellow plumage), and brown individuals (i.e., juveniles and subadults of both sexes with dull plumage). Blood and different feathers were collected for $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. Colorimetric variables of male feathers from the forehead and breast were measured to relate to isotopic values. The $\delta^{13}\text{C}$ blood values were similar between categories, indicating predominant access to C_4 basal resources throughout the year. The $\delta^{15}\text{N}$ values indicate that all categories incorporate high trophic level food resources. The difference in isotopic values between different feathers and blood was less than 2‰ for $\delta^{13}\text{C}$ and 1‰ for $\delta^{15}\text{N}$, reflecting tissue discrimination from a similar diet. The isotopic niche of yellow males was larger than that of yellow females and dull individuals, indicating greater dietary diversity. The more orange-red hue of the males' forehead was inversely correlated with $\delta^{15}\text{N}$, suggesting that these carotenoids may come from high trophic level sources. Meanwhile, the more yellow-orange hue of the breast was inversely associated with $\delta^{13}\text{C}$ and positively correlated with $\delta^{15}\text{N}$, suggesting that carotenoids originate from a more diverse diet of seeds and arthropods. This study demonstrates that resource partitioning driven by competition is important in driving carotenoid-based ornamentation among age and sex classes. Additionally, Saffron Finch males appear to acquire carotenoids from different food sources and modulate their deposition among ornaments.

Keywords: Carotenoids, Foraging ability, Plumage ornamentation, Saffron Finch, *Sicalis flaveola*, Stable isotope.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa que caracteriza a heterogeneidade do uso e cobertura vegetal da bacia do Alto Corumbá, onde está inserida a fazenda Tabapuã dos Pirineus, município de Cocalzinho de Goiás, GO (adaptado de Cordeiro et al. 2020).

Figura 2. (A) Indivíduo representativo de canário-da-terra jovem ou sub-adulto que expressa uma plumagem parda. (B) Macho adulto representativo com uma plumagem definitiva amarela com uma frente característica alaranjada. (C) Fêmea adulta representativa com uma plumagem definitiva amarela. Crédito das fotos: Projeto Forense Capes.

Figura 3. A seta vermelha indica a localização de cada tipo de pena amostrada em todas as categorias de canário-da-terra. Créditos das fotos: Projeto Forense Capes.

Figura 4. Gráficos de reflectância mostrando a porcentagem (\pm DP) de luz refletida nas penas da frente e peito dos machos amarelos.

Figura 5. Variação do $\delta^{13}\text{C}$ entre diferentes penas de fêmeas amarelas (em amarelo; A), machos amarelos (em laranja; B) e pardos (em cinza; C). A linha central exibe a mediana, a parte inferior e superior da caixa da caixa são o primeiro e quarto quartil.

Figura 6. Variação do $\delta^{15}\text{N}$ entre diferentes penas de fêmeas amarelas (em amarelo; A), machos amarelos (em laranja; B) e pardos (em cinza; C). A linha central exibe a mediana, a parte inferior e superior da caixa da caixa são o primeiro e quarto quartil.

Figura 7. Variação do $\delta^{13}\text{C}$ entre diferentes penas de fêmeas amarelas (em amarelo; A), machos amarelos (em laranja; B) e pardos (em cinza; C). A linha central exibe a mediana, a parte inferior e superior da caixa da caixa são o primeiro e quarto quartil.

Figura 8. Variação do $\delta^{15}\text{N}$ entre diferentes penas de fêmeas amarelas (em amarelo; A), machos amarelos (em laranja; B) e pardos (em cinza; C). A linha central exibe a mediana, a parte inferior e superior da caixa da caixa são o primeiro e quarto quartil.

Figura 9. Distribuição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ com a posição de cada indivíduo amostrado da categoria de fêmeas (em amarelo) e machos amarelos (em laranja) e pardos (em cinza), e os valores médios e o desvio padrão para cada tipo de pena (asa, cauda, frente e peito).

Figura 10. Espaço isotópico das fêmeas amarelas (em amarelo), machos amarelos (em laranja) e indivíduos pardos (em cinza) de *Sicalis flaveola* com os valores isotópicos de penas da asa.

Figura 11. Estimativa da largura do espaço do nicho isotópico das fêmeas amarelas (pontos em amarelo), machos amarelos (pontos em laranja) e indivíduos pardos (pontos em cinza) de canário-da-terra com os valores isotópicos de penas da asa. As caixas indicam intervalos de credibilidade de 95, 75 e 50% e os pontos representam o valor do SEA.B.

Figura 12. Gráfico Bayesiano da distribuição de probabilidade posterior da métrica da região de nicho (%) para fêmeas amarelas (em amarelo), machos amarelos (em laranja) e indivíduos pardos (em cinza) de *Sicalis flaveola*. As médias posteriores são representadas em linhas sólidas e os intervalos de credibilidade de 95% em linhas tracejadas; ambos são apresentados em cor turquesa.

Figura 13. Relação entre as variáveis colorimétricas (brilho, matiz e saturação) e valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das penas da frente de machos amarelos. A linha de tendência sinaliza as variáveis que foram significativamente correlacionadas.

Figura 14. Relação entre as variáveis colorimétricas (brilho, matiz e saturação) e valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das penas do peito de machos amarelos. A linha de tendência sinaliza as variáveis que foram significativamente correlacionadas.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Número de indivíduos de canários-da-terra capturados e analisados em cada amostragem de campo entre janeiro de 2017 e março de 2018 como parte do projeto Origem na fazenda Tabapuã dos Pireneus, no Município de Cocalzinho do Goiás, GO, Brasil. A quantidade de amostras que foram analisadas quanto ao $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ referente ao sangue e aos diferentes tipos de pena (asa, cauda, frente e peito). FA = fêmeas amarelas; MA = machos amarelos e P = pardos.

Tabela 2. Valor de p do teste post-hoc não paramétrico de Wilcoxon dos entre os meses de amostragem (janeiro, março, maio, julho, outubro e dezembro - 2017 e março - 2018) quanto aos valores de $\delta^{13}\text{C}$ para machos amarelos e indivíduos pardos e, para os valores de $\delta^{15}\text{N}$ dos indivíduos pardos referentes ao sangue. O símbolo (*) indica a significância estatística.

Tabela 3. Variação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (Média \pm desvio padrão) do sangue entre as categorias (fêmeas amarelas, machos amarelos e pardos) para cada mês amostrado. Cada linha da tabela representa as comparações realizadas pelo teste de Kruskal Wallis.

Tabela 4. Variação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (Média \pm desvio padrão) das diferentes penas (asa, cauda, frente e peito) entre as categorias (fêmeas amarelas, machos amarelos e pardos). Cada linha da tabela representa as comparações realizadas pelo teste de Kruskal Wallis.

Tabela 5. Variação de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (média \pm desvio padrão) do sangue e diferentes penas (asa, cauda, frente e peito) referente a classes de cor da plumagem: fêmeas e machos amarelos, e indivíduos pardos. Para cada linha da tabela, a diferença pareada indica a diferença dos valores isotópicos entre sangue e pena dos mesmos indivíduos de cada classe, e a comparação pareada indica a significância dessa respectiva diferença.

Tabela 6. Relação entre as variáveis colorimétricas (brilho, matiz e saturação) das penas da frente e peito de machos amarelos (N = 26) com os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$. A correlação de Spearman possui o fator r como coeficiente de correlação em que -1 indica uma correlação negativa e 1 como uma correlação positiva. O valor p indica a significância da relação.

1. INTRODUÇÃO

As exibições de tons conspícuos de cor amarela, laranja e vermelha são associados a deposição de pigmentos carotenoides e estão entre as características ornamentais mais comuns e visíveis em animais (McGraw, 2006). As cores ornamentais à base de carotenoides são mais difundidas em aves e a literatura relaciona a variação individual como um fator importante na comunicação sexual e social (Santos et al., 2011; Weaver et al., 2017; Delhey et al., 2023). Vários estudos mostraram como a avaliação da coloração à base de carotenoides pode fornecer informações chave sobre a qualidade individual em termos de aptidão e estado nutricional (Lozano, 1994; Alonso-Alvares et al., 2014). Como as aves não sintetizam endogenamente os carotenoides, a sua aquisição deve-se exclusivamente através da dieta (McGraw, 2006). A ornamentação à base de carotenoides é considerada um sinal fidedigno do forrageamento, refletindo numa capacidade competitiva potencialmente maior (Endler, 1980; McGraw, 2006).

Os carotenoides também são essenciais na manutenção de vários processos fisiológicos, atuando como antioxidantes, na síntese da vitamina A, assim, aumentando a imunidade (Simons et al., 2012). Como os carotenoides alocados para a plumagem não estão mais disponíveis para outras funções fisiológicas, pode haver uma compensação entre ornamentação e imunidade (Koch & Hill 2018). Portanto, a suposição é que apenas os indivíduos que são capazes de incorporar grandes quantidades de carotenoides, com baixas exigências nutricionais devido à saúde superior poderiam desenvolver uma ornamentação mais vibrante (Hipótese do trade-off entre recursos; Sversson & Wong 2011; Hill & Koch 2018).

Para expressar as cores nos ornamentos, os pigmentos carotenoides normalmente incorporados da dieta (i.e., alfa e beta-caroteno, luteína e zeantaxitinina) são depositados nos ornamentos e resultando tons de amarelo. Além disso, os pigmentos carotenoides podem ser convertidos através de um processo metabólico ligado aos processos celulares antes de serem depositados nas penas ornamentais, a qual depende da condição fisiológica do indivíduo (Hill, 2011). Por exemplo, os carotenoides da dieta são convertidos em outros pigmentos amarelos (e.g., dehidro-luteína e xantofila canária A & B) ou em ceto-carotenoides (e.g., astaxantina e cantaxantina) que expressa tons de laranja e vermelha (Weaver et al., 2018; Hill et al., 2023). Caso um indivíduo esteja em más condições fisiológicas em função de um pior estado de saúde, o processo de conversão dos carotenoides será afetado, e a expressão da plumagem será limitada. Isso levantou a hipótese da rota compartilhada, que propõe que a ornamentação à base de carotenoides convertidos representa um verdadeiro sinal fidedigno de qualidade individual em comparação com os carotenoides da dieta, não por ser caro, mas porque o metabolismo dos

carotenoides é um índice de processos internos no corpo (Hill e Johnson 2012; Weaver et al. 2017; 2018; Hill et al., 2023).

Embora a condição individual seja essencial para a expressão de uma coloração vibrante da plumagem, é fundamental destacar que os indivíduos são primariamente condicionados pelo acúmulo de carotenoides durante o forrageamento, independente da condição nutricional e de saúde. Se a disponibilidade de carotenoides não variar entre diferentes habitats, a variação na eficiência do forrageamento irá condicionar o resultado da expressão ornamental (Sparrow et al., 2017; Peneaux et al., 2020). Dessa forma, a coloração à base de carotenoides pode ser influenciada pelas condições prevalentes do habitat, e, forrageadores ineficientes podem limitar a expressão dos ornamentos devido a incorporação insuficiente de carotenoides (Tonra et al., 2014; Peneaux et al., 2020). Portanto, é esperado que os forrageadores mais eficientes, por serem melhores competidores, devem ser capazes de incorporar recursos alimentares alternativos e de alta qualidade em termos de alto teor de carotenoides (Bascuã et al., 2009; Senar et al., 2010; Catoni et al., 2011) a fim de propiciar ornamentos mais vibrantes.

Apesar das diferenças individuais nos ornamentos seja resultado diretamente e/ou indiretamente da incorporação de grandes quantidades de carotenoides através de um forrageamento eficiente, a literatura relaciona de maneira indireta a expressão ornamental à base de carotenoides com a capacidade de forragear e competitiva. Por exemplo, os indivíduos que expressam ornamentos à base de carotenoides mais vibrantes no período reprodutivo são capazes de aumentar a eficiência no forrageamento para prover recursos ricos em proteínas à prole, como larvas de artrópodes (e.g., carotenoides ricos em antioxidantes; Kappes et al., 2009; García-Navas et al., 2012 Fargevielle et al., 2023). Já em períodos não reprodutivos, quando a disponibilidade de recursos tende a ser baixa, a expressão mais vibrante da plumagem foi associada a um sinal de dominância social, indicando a capacidade de mediar a resolução de disputas físicas com co-específicos, e, portanto, condicionando o acesso preferencial por recursos de alta qualidade (Leitão et al., 2019; Araújo-Silva et al., 2023). Apenas em um estudo experimental a ornamentação à base de carotenoides foi relacionada diretamente com a eficiência no forrageamento. Senar & Escobar (2002) relataram que o tamanho da faixa amarela à base de carotenoides de *Carduelis spinus* estava relacionada com a eficiência individual no forrageamento. Os autores observaram que indivíduos de *C. spinus* capturados em anos não irruptivos, anos em que não houve um aumento incomum na abundância de indivíduos, e com maior tamanho da listra, visitavam em maior frequência as iscas em comparação aos indivíduos de anos irruptivos (Senar & Escobar, 2002).

É importante ressaltar que a coloração da plumagem à base de carotenoides pode variar gradualmente entre as classes de idade e sexo, o que pode resultar de diferenças na dieta e no uso do habitat devido a diferentes necessidades dietéticas e a experiência do forrageamento. Alguns estudos relataram mudanças na coloração relacionadas à idade (e.g., Pagani-Núñez & Senar 2012; Ward et al., 2021), sexo (e.g., Walker et al., 2014; Dunn et al., 2015) e uso de nicho (e.g., Delhey et al., 2013; Kernaléguen et al. 2016), embora apenas Pagani-Núñez et al., 2019 tenham integrado esses fatores considerando a ornamentação à base de carotenoides. Os autores evidenciaram diferenças no uso do nicho entre as classes de idade de *Parus major* durante a muda das penas ornamentais à base de carotenoides, sugerindo variações quanto a exploração de recursos alimentares. Por outro lado, as classes de sexo tinham uma alta sobreposição de nicho, indicando uma alta similaridade na exploração de recursos (Pagani-Núñez et al., 2019). Entretanto, é necessário considerar as classes de idade e sexo simultaneamente para determinar diferenças na dieta e, conseqüentemente, o uso diferencial do nicho devido às diferenças quanto ao forrageamento. Já que a competição e partição de recursos alimentares entre as categorias pode atuar como mecanismo causal da variação na expressão de traços ornamentais.

A análise de isótopos estáveis fornece informações complementares às medições tradicionais da ecologia de forrageamento (Buelow et al., 2018). Essa abordagem vem se mostrando eficiente ao inferir a dimensão trófica de consumidores e seus respectivos nichos ecológicos em função do uso do habitat (Hoening et al., 2022; Navarro et al., 2022), e, portanto, pode contribuir para desvendar as variações do forrageamento entre classes de idade e sexo. A partir da análise da razão isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$); incorporado através da dieta nos tecidos de um organismo, é possível estimar os insights sobre a dimensão trófica do nicho ecológico, contribuindo a descrever as teias alimentares e a traçar o fluxo de energia no ecossistema (Newsome et al., 2012; Pelage et al., 2022; Pereira et al., 2023).

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ dos tecidos animais permitem fazer inferências do uso do habitat ao relacionar a fonte de energia basal incorporada na dieta (i.e., habitat dominado por plantas C_3 variam os valores entre -32‰ e -24‰ e dominados por plantas C_4 variam os valores entre -15‰ e -8‰) (DeNiro & Epstein 1979; Fry, 2006; Boecklen et al., 2011). Já os valores de $\delta^{15}\text{N}$ indicam o nível trófico, uma vez que os valores aumentam ao longo da cadeia trófica alimentar (Post, 2002; Fry, 2006, Boecklen et al., 2011). A combinação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ permite inferir vários aspectos da ecologia trófica dos consumidores, como a variação da dieta e uso do habitat, especialização, padrões de movimentação e impacto antropogênico na cadeia alimentar (Fry, 2006; Yeakel et al., 2016; Buelow et al., 2018; Pompermaier et al., 2022).

No entanto, é importante destacar que o período de integração dos valores isotópicos não reflete imediatamente a composição isotópica da dieta nos tecidos, mas integra-se ao longo do tempo. Por esta razão, tecidos com diferentes períodos de renovação em um mesmo indivíduo podem fornecer informações relevantes sobre a variação da dieta em múltiplas escalas temporais (Martínez del Rio et al., 2009; Guaraldo et al., 2019; Pereira et al., 2023). Por exemplo, tecidos metabolicamente ativos (e.g., sangue) inferem informações sobre a dieta a curto prazo dependendo do metabolismo do grupo de interesse; tecidos inertes (e.g., garra e pena) inferem a dieta durante a formação do tecido específico, embora dependa do tempo de formação de um tecido específico (Vander Zander et al., 2015; Hoening et al., 2022). A partir dos valores isotópicos de diferentes tecidos, aspectos ligados a variação intraespecífica da dieta podem ser desvendados entre classes de idade, com base na experiência do forrageamento, e entre sexos, considerando as necessidades dietéticas devido a reprodução, ambos ao longo do tempo.

Vários estudos têm utilizado as análises de isótopos estáveis para inferir propriedades do nicho, como largura do nicho, posição trófica, diversidade de recursos assimilados e grau de sobreposição do nicho (Jackson et al., 2011; Newsome et al. 2012; Yeakel et al. 2016). Newsome et al. (2007) desenvolveram uma forma de avaliar o nicho alimentar por meio do espaço multivariado com base nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, chamando de espaço isotópico, o que indica se os indivíduos de um mesmo grupo são semelhantes ou diferentes em termos de posição trófica e uso de recurso basal. O espaço isotópico fornece informações sobre padrões espaço-temporais de mudança de nicho, relacionado à capacidade de explorar recursos alimentares e às respostas de grupos às mudanças de habitat (Newsome et al., 2007; Jackson et al., 2011; Newsome et al. al., 2012; Yeakel et al., 2016). Mudanças na largura do espaço isotópico podem estar relacionadas à fragmentação do habitat (Carvalho et al., 2017; Pereira et al., 2023), urbanização (Navarro et al. 2021ab), diversidade evolutiva (Fedosov et al., 2014), mudanças na disponibilidade de recursos alimentares (Bosenbecker e Bugoni, 2020; Pompermaier et al., 2022) e mudanças sazonais nos recursos alimentares essenciais (Frieck-Craing et al., 2015; Camargo et al., 2021). Dessa forma, o espaço isotópico pode ser utilizado para inferir as variações do forrageamento entre classes de idade e sexo em termos de posição trófica e uso de recursos basais, considerando diferenças na expressão ornamental à base de carotenoides.

Além da variação nas estratégias de forrageamento entre grupos, alguns estudos utilizaram os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ para inferir níveis de especialização intrapopulacional da dieta a fim de correlacionar com o resultado da expressão ornamental à base de carotenoides (e.g., Reudink et al., 2009; Sparrow et al., 2017; Mahoney et al., 2022). Já que os indivíduos

podem apresentar diferentes níveis de especialização da dieta e a concentração de carotenoides pode variar de acordo com os recursos alimentares assimilados. Em uma revisão, Olson (2006) relatou que frutos (fonte basal C₃) apresentam umas elevadas concentrações de carotenoides em comparação a sementes e grãos (fonte basal C₄) que por sua vez, o seu acesso consistente pode limitar a expressão da plumagem para espécies granívoras (McGraw et al., 2001; Mahler et al., 2003). Além disso, pequenos artrópodes também se tornam fontes alimentares alternativas devido ao fato de que acumulam altas concentrações de carotenoides (Olson, 2006). Nesse aspecto, é importante inferir com precisão as diferenças da dieta entre os indivíduos, a fim de compreender como os recursos consumidos podem refletir na expressão ornamental à base de carotenoides (Frincke-Craig et al., 2015). Por exemplo, em um estudo com *Icterus bullockii*, foi demonstrado que os valores de $\delta^{15}\text{N}$ das penas estavam diretamente associados com conteúdo de carotenoides e matiz das penas (Sparrow et al. 2017). As aves com valores mais baixos de $\delta^{15}\text{N}$ expressaram uma tonalidade mais laranja das penas do peito, indicando uma quantidade maior de frutas na dieta. Além disso, houve uma relação positiva das concentrações totais de carotenoides com o $\delta^{15}\text{N}$, indicando que os carotenoides não estavam limitados no habitat, e os indivíduos estavam incorporando os carotenoides de outras fontes alimentares, como pequenos artrópodes (Sparrow et al., 2017).

O canário-da-terra (*Sicalis flaveola brasiliensis*) é uma espécie que pode ser modelo para estudar as relações entre a variação do forrageamento e a relação da variação da dieta com a ornamentação à base de carotenoides. Os adultos começam a desenvolver uma plumagem amarela definitiva apenas após o segundo período reprodutivo, com machos apresentando uma plumagem mais brilhante e saturada em comparação às fêmeas (Marques-Santos et al., 2018). Esse padrão de coloração potencialmente reflete uma alta habilidade no forrageamento, uma vez que a espécie possui tons característicos à base de carotenoides, além de que a sua expressão pode exercer um papel essencial na comunicação social e sexual, em particular para os machos devido à fronte alaranjada (Cruz-Bernate et al., 2023). Portanto, é de se esperar que indivíduos com a plumagem definitiva amarela tenham o uso diferencial do nicho em termos de acesso a recursos alimentares mais rentáveis de alto teor de carotenoides em comparação a juvenis e sub-adultos que compartilham uma plumagem devido ao atraso na maturação da plumagem (Sick 1997; Marques-Santos et al., 2018). Dessa forma, os indivíduos com plumagem atrasada podem ser classificados em uma mesma classe de idade e de cor da plumagem (Hawkins et al., 2012). Além disso, o atraso na maturação da plumagem pode atuar como um sinal de submissão social ao informar aos co-específicos uma baixa capacidade competitiva (Lyon & Montgomerie,

1986; Hawkins et al., 2012), condicionando os indivíduos de plumagem atrasada a acessarem recursos menos rentáveis em termos de teor de carotenoides

O canário-da-terra é uma ave de hábito residente e a subespécie *S. f. brasiliensis* se distribui amplamente na região do Brasil central (Rising & Jaramillo 2024) que é dominado pelo bioma Cerrado (uma savana neotropical), marcado por uma alta sazonalidade em relação a disponibilidade de recursos alimentares. Isso propicia múltiplas características do nicho ecológico para uma espécie, resultando no uso generalizado de recursos e na escolha de habitat. Já que o Cerrado abrange uma estação quente e chuvosa (outubro-março) onde por sua vez há um aumento na abundância e variedade de recursos alimentares. Neste período, várias espécies vegetais começam a florescer e aumentam a oferta de sementes e frutos (Batalha & Martins, 2004), além do aumento da abundância de artrópodes (Silva et al., 2011), que são consumidos por espécies que seguem um ciclo anual ligado ao período de muda e reprodutivo (Marini et al., 2012). Subsequentemente, o Cerrado é marcado por uma estação seca (abril – setembro) onde a disponibilidade de recursos alimentares tende a diminuir drasticamente, como consequência, há uma intensificação na competição inter e intraespecífica por recursos alimentares. Portanto, a variação temporal quanto à oferta de recursos alimentares pode desempenhar um importante força seletiva para que os competidores mais eficientes sejam capazes de acessar recursos alimentares alternativos de alta qualidade ao longo das estações do ano (Buelow et al., 2018), e, portanto, expressar ornamentos à base de carotenoides mais vibrantes (Peneaux et al., 2020).

Dada a importância do papel das espécies na cadeia alimentar para o funcionamento dos ecossistemas, é necessário compreender as relações entre a heterogeneidade ambiental e os nichos que diferentes classes de idade e sexo de uma mesma espécie podem utilizar ao considerar a imprevisibilidade na oferta de recursos alimentares impulsionado pela competição. Nesse aspecto, a coloração à base de carotenoide pode potencialmente refletir a habilidade de forrageamento e maior capacidade competitiva em termos de aquisição de recursos alimentares alternativos e de alta qualidade em relação aos indivíduos que ainda não desenvolveram uma plumagem vibrante.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESES

O objetivo do presente trabalho foi avaliar, através do uso de isótopos estáveis de carbono e nitrogênio, como o uso do habitat por indivíduos de canário-da-terra (*Sicalis flaveola*) de diferentes classes de idade e sexo reflete variações na dieta e sua relação com a expressão da coloração ornamental da plumagem.

2.1 *Objetivos Específicos*

- Inferir a variação da dieta ao longo do ano para indivíduos adultos (machos e fêmeas amarelas) e jovens (de coloração parda) de canário-da-terra, através da análise da razão isotópica de carbono e nitrogênio do sangue;
- Analisar a consistência temporal da dieta a partir da razão isotópica de carbono e nitrogênio de diferentes tecidos com diferentes períodos de renovação (sangue, pena da asa, cauda, frente e peito) para os indivíduos adultos (machos e fêmeas amarelas) e jovens (de coloração parda) de canário-da-terra;
- Relacionar as variáveis colorimétricas (brilho, matiz e saturação) com a dieta, através da razão isotópica de carbono e nitrogênio da pena da frente e peito de machos amarelos.

2.2 *Hipóteses*

1. A dieta varia ao longo do ano entre os adultos (machos e fêmeas amarelas) e jovens (pardos) de canário-da-terra conforme a capacidade competitiva e a variação temporal de recursos no Cerrado Central, inferido pelos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do sangue.
 - Todas as categorias podem apresentar uma ampla variação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$, indicando o acesso a fontes basais C_3 e C_4 , além de altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ que deve indicar o acesso a fontes proteicas de alto nível trófico, como artrópodes.
 - Em períodos de baixa oferta de recursos alimentares, todas as categorias devem apresentar valores semelhantes de $\delta^{13}\text{C}$, indicando o acesso a fontes basais C_4 , e apenas as fêmeas e machos amarelos devem manter um elevado $\delta^{15}\text{N}$ por serem forrageadores mais eficientes e com uma maior capacidade competitiva em comparação aos pardos, uma vez que fontes proteicas de alto nível trófico, como artrópodes, seriam um recurso limitante neste período.

2. Os valores isotópicos entre diferentes tecidos com diferentes períodos de renovação (curto-prazo - sangue *versus* longo prazo – pena) podem estimar a consistência temporal do uso dos recursos de cada categoria (fêmeas, machos e jovens);
 - Os valores isotópicos médios entre sangue e pena de cada categoria devem variar quanto ao $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, indicando mudanças da fonte basal e posição trófica.
 - As diferentes penas (pena da asa, cauda frente e peito) podem variar os valores isotópicos entre as categorias, e entre as penas para cada categoria, indicando uma alta variabilidade da dieta.
 - Fêmeas e machos amarelos devem apresentar uma dieta mais diversificada, com pouca sobreposição, indicando uma maior capacidade de explorar recursos em relação aos indivíduos pardos – através do espaço isotópico com penas da asa.

3. A coloração reflete diferenças na dieta entre os machos amarelos inferidos pelos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ na pena.
 - O maior grau de ornamentação da frente (maior brilho, maior saturação e uma matiz mais laranja-avermelhada) pode ser relacionado ao maior acesso a fontes basais C_3 e baixa incorporação de recursos de alto nível indicado pelo baixo $\delta^{15}\text{N}$.
 - O maior grau de ornamentação do peito (maior brilho, maior saturação e uma matiz mais amarelada) pode ser relacionado ao maior acesso a fontes basais C_3 e baixa incorporação de recursos de alto nível indicado pelo baixo $\delta^{15}\text{N}$.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Sinalização e Coloração da Plumagem em Aves

A plumagem conspícua das aves tem atraído uma notável atenção, com diversos estudos focados em investigar a sua função e evolução (Hill & McGraw 2006). Em muitas espécies, a plumagem é altamente variável e fenotipicamente plástica, podendo ser influenciada tanto pela condição do habitat (Reudink et al., 2015; Sparrow et al., 2017) quanto pela condição fisiológica (Moller et al., 2000; Dias et al., 2016). Além dos fatores ontogenéticos relacionados a variação gradual entre classes de idade e sexo (Hawkins et al., 2012; Pagani-Núñez & Senar, 2012; Dale et al., 2015), a variação de cores mais exuberantes está associada a uma maior heterogeneidade dietética (Delhey et al., 2023). Conseqüentemente, os indivíduos com cores vibrantes tendem a ocupar preferencialmente habitats de alta qualidade em termos de adequação à sobrevivência e reprodução (Peneaux et al., 2020; Delhey et al., 2013;2023). Existe um alto custo individual para produzir e/ou manter ornamentos com cores mais vibrantes (Zahavi, 1975; Graffen, 1990), o que pode tornar a expressão da plumagem um indicador fidedigno de qualidade. Como consequência, os indivíduos que possuem tal característica teriam maior acesso a potenciais parceiros ou capacidade de afugentar concorrentes (Santos et al., 2011, Weaver et al., 2017; White, 2020).

As cores vibrantes parecem ser impulsionadas por pressões da seleção sexual (Darwin, 1871; Dunn et al., 2015; Price, 2019). Em particular, através da seleção intersexual, ou seja, a seleção diferencial de indivíduos de um sexo pelos do sexo oposto (Darwin, 1871; Andersson, 1994; Dale et al., 2015). Dessa forma, a expressão da cor da plumagem sinaliza informações ligadas à aptidão e qualidade genética (Griffith et al., 2002) e, geralmente fêmeas, usam isso como critério para avaliar potenciais parceiros (Blount & McGraw 2008; Nolazco et al., 2023), além de tomar decisões de acasalamento extra par (Bernítez-Saldívar & Massoni, 2018; Thibault et al., 2022). Dessa forma, indivíduos que possuem cores mais extravagantes acabam sendo favorecidos, o que resulta em um aumento no sucesso reprodutivo (Cotton et al., 2006).

Alternativamente, a plumagem pode sinalizar a qualidade individual durante a época não reprodutiva. A variação na coloração da plumagem fornece informações sobre o status de dominância de um indivíduo ou sua capacidade competitiva (Rohwer, 1975). Observações empíricas mostram que indivíduos de plumagem conspícua são capazes de mediar a resolução de conflitos causados pela competição direta por recursos (Leitão et al., 2019; Araújo-Silva et al., 2022). Além de que em estudos experimentais, a manipulação no grau de ornamentação

como o brilho e saturação da plumagem pode alterar o status de dominância social (e.g., Pryke et al., 2002). Por sua vez, o papel da seleção social pode alavancar um papel importante na evolução dos traços de plumagem (Senar, 2006), especialmente em situações em que a disponibilidade de recursos alimentares é limitada.

O atraso no desenvolvimento de uma coloração definitiva adulta da plumagem é comum para algumas espécies, e geralmente, ocorre até o fim da primeira estação reprodutiva, na qual os indivíduos estão aptos para se reproduzir (Hawkins et al., 2012). Nessas espécies, a plumagem de juvenis é substituída por uma plumagem sutil que difere de indivíduos adultos e é similar à de juvenis (Marini et al., 2015; Benítez-Saldívar et al., 2018; Ward et al., 2021). Ainda não existe consenso sobre a função do atraso na maturação da plumagem, mas é levantada a hipótese de que esta estratégia de história de vida beneficia os reprodutores do primeiro ano, reduzindo encontros agonísticos com indivíduos mais velhos (Lyon & Montgomerie, 1986; Senar, 2006; Hawkins et al., 2012). Por outro lado, o atraso na maturação da plumagem poderia atuar como um sinal de submissão social. A plumagem de subadultos poderia sinalizar de maneira honesta a capacidade competitiva inferior em disputas físicas com co-específicos, muitas vezes ocasionada pela competição direta por recursos (Lyon & Montgomerie, 1986), especialmente quando a sua disponibilidade é limitada pelo habitat.

3.2 Cor da plumagem em aves

Para compreender como a expressão da cor da plumagem atua como um sinal fidedigno de qualidade individual, é necessário considerar o tipo de cor sob investigação. A cor da plumagem pode ser caracterizada pelo arranjo estrutural das penas e/ou pela deposição de pigmentos. Essas cores são produzidas a partir da disposição da estrutura das penas, dos melanossomos na estrutura física das penas, o que provoca a dispersão da luz à medida que esta passa através de variações de nível nanométrico da estrutura da pena (Prum, 2006; Hill, 2009). A presença e a distribuição espacial dos melanossomos e de, eventualmente, outras estruturas biológicas, como grânulos de pigmento, determinam a forma como as ondas de luz são dispersas e foram a cor resultante (Prum, 2006) e com isso reflete tons bastante chamativos, como azul-violeta, branco e verde. É importante ressaltar que a expressão da coloração estrutural também pode variar de acordo com a estrutura da pena, como nas penas iridescentes (Hill, 2009). Neste caso, o exemplo mais comum é o gorjeio (penas da garganta) vibrante em muitas espécies de beija-flores (e.g., Venable et al., 2022). As cores estruturais iridescentes são resultado da dispersão da luz incidente causada pela estrutura microscópica das bárbulas, que funciona como

um prisma e divide a luz em cores ricas e componentes à medida que o ângulo de observação muda (Doucet et al., 2006; Hill, 2009). Como resultado, a luz refletida torna-se visível num espetáculo brilhante com uma ampla variação de cores ornamentais (Hill, 2009).

As cores baseadas em pigmentos podem ser divididas em dois tipos diferentes: as baseadas em carotenoides e baseadas em melanina. Os pigmentos de melanina são responsáveis pela expressão de tons escuros como preto, cinza e castanho (Stoddard & Prum, 2011). A melanina é sintetizada endogenamente a partir de aminoácidos comuns na dieta. Embora não dependa exclusivamente da dieta, a qualidade da ornamentação pode ser mantida pela disposição de nutrientes (Jawor & Breitwisch, 2003, 2008). Alguns estudos mostram que cores à base de melanina podem sinalizar a condição individual, e outros processos fisiológicos subjacentes à síntese da melanina (Jawor & Breitwisch, 2003; McGraw, 2006; D'Alba et al., 2014). O desenvolvimento da pigmentação melânica ornamental se mostra associado a níveis de competição social agressiva durante o crescimento das penas (Jawor & Breitwisch 2003).

Os carotenoides, por outro lado, não podem ser sintetizados endogenamente e devem ser adquiridos exclusivamente através da dieta (McGraw, 2006). Esse fato levantou a ideia de que ornamentos à base de carotenoides sinalizam a capacidade de forrageamento, especialmente em habitats com menor disponibilidade de carotenoides (Endler, 1980; McGraw, 2006). Além disso, os carotenoides podem ser alocados em funções imunológicas, havendo um *trade-off* entre ornamentação e sobrevivência (Hill & Koch, 2018). Em particular, o pressuposto é que apenas indivíduos de alta qualidade e com acessos consistentes à alimentos ricos em carotenoides sejam capazes de sinalizar a aptidão individual, conferindo um potencial indicador fidedigno da qualidade individual geral.

3.3 Carotenoides e Coloração Ornamental

Os carotenoides recebem um notável destaque em estudos com aves por fornecer informações sobre a aptidão e qualidade individual através da avaliação de tons de amarelo, laranja e vermelho nos ornamentos (McGraw, 2006; Svensson & Wong, 2011). Por esta razão, a expressão da cor dos ornamentos confere um critério importante na comunicação inter e intratextual (Blount & McGraw, 2008). Vários estudos mostram que ornamentos à base de carotenoides estão associados com outras medidas de qualidade individual em outros grupos, como anfíbios (Ogilvy et al., 2012; Brenes-Soto & Dierenfeld, 2014), peixes (Luo et al., 2021) e répteis (Steffen & McGraw, 2009). No entanto, os mecanismos causais que ligam a cor

baseada em carotenoides à qualidade individual ainda não estão claros, embora dois argumentos não mutualmente exclusivos foram propostos: (i) a aquisição de carotenoides através do forrageamento eficiente e; (ii) o status de condição nutricional e fisiológica do indivíduo (Endler, 1980; McGraw, 2006; Alonso-Alvares et al., 2014; Koch & Hill, 2018).

Os carotenoides são sintetizados em sua maioria por produtores primários, e os vertebrados não são capazes de sintetizar endogenamente esse pigmento, portanto, só podem adquiri-los exclusivamente através da dieta (Hill & Montgomerie, 1994; McGraw, 2006). Isso torna a qualidade do habitat um fator importante no resultado da expressão dos ornamentos, influenciando diretamente na disponibilidade de carotenoides. Em um estudo com machos de mariquita-de-rabo-vermelho (*Setophaga ruticilla*), os indivíduos que passam o período não reprodutivo na região do caribe, correspondente ao local de muda, retornavam com as penas da cauda com croma vermelho menor em comparação de como a pena estava quando amostrada no ano anterior (Tonra et al., 2014). A redução no croma vermelho provavelmente se deveu à menor oferta de carotenoides nos recursos alimentares durante a muda em comparação ao ano anterior, o que estaria limitando o crescimento de uma plumagem de alta qualidade (Tonra et al., 2014). Posteriormente, Reudink et al. (2015) verificaram como as condições ambientais antes da estação reprodutiva em ambos os sexos, correspondente ao período de muda (junho a setembro), afetava a coloração dos ornamentos desta espécie durante uma década. Como resultado, os indivíduos expressaram penas com maior croma vermelho e menor brilho em anos seguidos de alta chuva de julho e a baixa temperatura de agosto. Esse estudo sugere que as chuvas mais altas durante o período de muda pode aumentar a abundância de artrópodes e a disponibilidade de carotenoides (Reudink et al., 2015).

A maior eficiência individual durante o forrageamento pode favorecer a incorporação de grandes quantidades de carotenoides e, conseqüentemente, propiciar ornamentos mais extravagantes (Endler, 1980; Sparrow et al., 2017; Peneaux et al., 2020). Se a variação individual no forrageamento diferir entre habitats, então o resultado da expressão da plumagem pode ser condicionado pelas condições prevalentes de um habitat. Portanto, forrageadores ineficientes em ambientes ricos em carotenoides poderiam ter um desempenho ainda pior em ambientes com uma baixa disponibilidade de carotenoides (Peneaux et al., 2020). Essa relação foi observada em um estudo experimental, onde Senar & Escobar (2002) documentaram que o tamanho da faixa amarela à base de carotenoides de *Carduelis spinus* estava correlacionada com a eficiência individual no forrageamento. Entretanto, os autores também propuseram investigar o quão facilmente os indivíduos poderiam ser atraídos por um playback para um sítio de alimentação com iscas vivas, com base no pressuposto de que os indivíduos atraídos por

iscas são aqueles que dependem de outros forrageadores para encontrar obter recursos alimentares. Ao separar os indivíduos capturados em anos irruptivos e não irruptivos, ou seja, os indivíduos capturados em anos que houve um aumento incomum da abundância devido ao acréscimo de indivíduos fora de época, os autores observaram que o *C. spinus* de anos não irruptivos visitavam com maior frequência as iscas em comparação aos indivíduos de anos irruptivos (Senar & Escobar, 2002). Embora os autores não tenham sugerido, é provável que esse resultado indique uma maior eficiência no forrageamento ao considerar mudanças na disponibilidade de recursos alimentares e nas forças de competição por recursos de alta qualidade. Portanto, para compreender como a coloração ornamental prediz a habilidade de forragear, é necessário considerar as eventuais variações da dieta ao longo do tempo.

Para propiciar a coloração das penas, os carotenoides podem ser depositados diretamente da dieta como carotenoides amarelos comuns da dieta (i.e., alfa e betacaroteno, luteína e zeantaxitinina), ou podem ser submetidos a processos conversões metabólicas antes de serem depositados nas penas ornamentais. Por exemplo, os carotenoides amarelos comuns da dieta podem ser convertidos em pigmentos amarelos convertidos (e.g., dehidro-luteína e xantofila canária A & B), ou em keto-carotenoides (e.g., astaxantina e cantaxantina) de expressão laranja e vermelha (McGraw, 2006, Weaver et al., 2018, Hill et al., 2023). Esses mecanismos de conversão dos carotenoides da dieta são intimamente ligados aos processos celulares vitais e, portanto, dependem das condições fisiológicas dos indivíduos (Hill, 2011). Isso levantou a hipótese da rota compartilhada, que propõe que ornamentos mais vibrantes à base de carotenoides convertidos representam, em particular, um sinal fidedigno da qualidade individual em contraste a uma ornamentação à base de carotenoides amarelos da dieta porque os processos de conversão metabólicas demandam um alto custo energético (Weaver et al., 2018). Indivíduos em más condições fisiológicas em função de um pior estado de saúde podem afetar o processo de conversão dos carotenoides e, limitar a expressão da plumagem.

É importante também ressaltar que além da produção de cor, os carotenoides são essenciais na manutenção do sistema imunológico; atuando como antioxidantes e na síntese da vitamina A (Svensson & Wong, 2011; Simons et al., 2012; Koch & Hill, 2018). Neste aspecto, quando o sistema imunológico é limitado pela condição nutricional em função de um pior estado de saúde, os benefícios imunológicos serão perdidos se os carotenoides forem usados para a produção de cores (Navara & Hill, 2003, Svensson & Wong 2011). O duplo papel dos carotenoides, tanto como corantes, quanto como um componente fundamental nos processos fisiológicos é à base da hipótese de alocação de recursos (Weaver et al., 2017), que propõe que os ornamentos à base de carotenoides funcionam como sinais fidedignos da qualidade

individual devido ao *trade-off* entre o uso dos carotenoides em processos fisiológicos e de ornamentação (Lozano, 1994; Navara & Hill 2003; Koch & Hill, 2018). Apenas os indivíduos com grandes reservas de carotenoides e baixas exigências fisiológicas podem dedicar uma quantidade considerável de carotenoides para a ornamentação afim de propiciar ornamentos mais extravagantes.

Uma plumagem mais extravagante é produto das rotas bioquímicas, pelos quais os carotenoides são absorvidos, transportados, metabolizados e depositados (Hill et al., 1994) ao gerar conexões mais fortes entre ornamentação e qualidade individual. Assim, os ornamentos à base de carotenoides devem informar de maneira fidedigna a capacidade de forragear, estado nutricional e estado de saúde (Endler, 1980).

3.4 Uso de Isótopos Estáveis em Estudos sobre Dieta

Os isótopos estáveis são variações de um mesmo elemento químico com o mesmo número de prótons, mas que diferem quanto ao número de nêutrons. Os isótopos com menor massa atômica (soma dos prótons com nêutrons) são normalmente denominados como “leves” e são mais abundantes na natureza em comparação com o isótopo com um nêutron a mais, que, por sua vez, é considerado “pesado” (Fry, 2006). A variação na proporção dos isótopos é o que permite a sua aplicação em estudos sobre dieta, baseando-se na interpretação de como essa proporção dos valores isotópicos da dieta podem estar refletidos nos tecidos animais.

Em particular, os estudos sobre dieta empregam a análise conjunta da razão isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$), a qual nos fornece informações sobre uso do habitat, no que diz respeito às fontes alimentares basais acessadas, como é capaz de refletir o nível trófico do organismo avaliado. O $\delta^{13}\text{C}$ expresso no tecido de um consumidor reflete o tipo de fonte alimentar basal que este explorou, e pode indicar o habitat em que ele forrageira. Isso porque os produtores primários que predominam em um determinado habitat podem diferir expressivamente de outro habitat em termos isotópicos (i.e., discriminam plantas C_3 e C_4). Ambientes florestais são dominados por plantas de ciclo fotossintético C_3 , valores de $\delta^{13}\text{C}$ que variam de -32 a -24% . Já as áreas com predomínio de gramíneas, como savanas abertas, campos e pastagens exóticas são dominados por plantas de ciclo fotossintético C_4 , e apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -15 e -8% (Fry, 2006). Os valores intermediários de $\delta^{13}\text{C}$ pressupõe que um determinado consumidor é capaz de explorar suas fontes alimentares basais em diferentes tipos de habitats.

Por outro lado, em típicas relações presa-predador e herbívoro-planta, o $\delta^{15}\text{N}$ denota padrões alimentares e o nível trófico dos consumidores. Isso deve-se ao fato de que o $\delta^{15}\text{N}$ aumenta em aproximadamente $\sim 3\%$ ao longo dos níveis tróficos da cadeia alimentar (Migawada & Wada 1984; Post, 2002). Portanto, é esperado que predadores de topo de cadeia tenham valores de $\delta^{15}\text{N}$ mais elevados em comparação aos consumidores primários, tornando um marcador adequado para inferir diferenças da dieta durante o forrageamento entre consumidores (Martínez del Rio et al., 2009; Buelow et al., 2018; Pereira et al., 2023b). O uso conjunto do $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ vem se mostrando eficiente para desvendar a dimensão trófica do nicho ecológico, contribuindo para descrever teias alimentares e traçar o fluxo de energia entre organismos. A partir disso, muitos estudos têm utilizado isótopos estáveis como uma importante ferramenta para inferir a posição trófica de consumidores e suas variações em função da estrutura do habitat (Newsome et al., 2007; Jackson et al., 2011; Layman et al., 2012).

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ permitem caracterizar as propriedades do nicho, como a largura, posição trófica, diversidade de recursos assimilados, grau de sobreposição, variação alimentar e trajetórias de caminho de nicho (Newsome et al., 2007; Yeakel et al., 2016). Newsome et al. (2007) desenvolveram uma forma de avaliar o nicho alimentar com base nos valores da razão isotópica de carbono e nitrogênio em um espaço δ bidimensional, chamando de espaço isotópico. Os parâmetros do espaço isotópico podem informar sobre padrões espaço-temporais da mudança de nicho, atuando como um forte preditor da capacidade de exploração de recursos alimentares e respostas das espécies as alterações do habitat (Newsome et al., 2007; Jackson et al., 2011; Newsome et al., 2012; Yeakel et al., 2016). O espaço isotópico pode indicar se os indivíduos de uma mesma espécie ou de um mesmo grupo são semelhantes ou diferentes quanto a posição trófica e a utilização de recursos basais. A partir dessas análises, alguns estudos têm demonstrado que mudanças na largura do espaço isotópico podem estar relacionada com a fragmentação do habitat (Carvalho et al., 2017; Mattos, 2019; Pereira et al., 2023), urbanização (Navarro et al., 2021ab), diversidade evolutiva (Fedosov et al., 2014), alterações na disponibilidade de recursos alimentares (Bosenbecker & Bugoni et al., 2020; Pompermaier et al., 2022) e até mudanças sazonais em um mesmo ambiente (Frieck-Craing et al., 2015; Camargo et al., 2021).

3.5 Uso de Isótopos Estáveis em estudos sobre variação temporal da dieta

A integração dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em tecidos animais com diferentes períodos de renovação nos permite fazer inferências relacionadas a variação temporal da dieta em um

mesmo indivíduo (Vander Zanden et al., 2015; Bond et al., 2016; Hoening et al., 2022), uma vez que o período de integração dos valores isotópicos não reflete imediatamente a composição isotópica da dieta nos tecidos, mas integra-se ao longo do tempo. Os tecidos metabolicamente ativos (e.g., fígado, músculo e sangue) inferem informações sobre a dieta a curto prazo dependendo do metabolismo do grupo e espécie de interesse (Vander Zande et al., 2015; Hoening et al., 2022). Por exemplo, foi relatado para pequenos passeriformes que o período de renovação do fígado é estimado em 15 dias e para o músculo em cerca de 33 dias (Carleton et al., 2008). Já o sangue, o período de renovação total são de cerca de 30 dias (Hobson & Clark, 1992; Bearhop et al., 2002). Os tecidos metabolicamente inertes queratinizados (e.g., garra e pena) inferem a dieta a longo prazo, embora dependa do tempo de formação de um tecido específico (Vander Zande et al., 2015). Estudos com aves mostram que as penas fornecem informações sobre a dieta durante o período de muda, de modo que reflete a dieta durante a formação da pena (Blight et al., 2015; Navarro et al., 2022), o que geralmente é anual, enquanto as garras, o período de informação da dieta retido é estimado entre 2 e 5 meses (Hobson & Clark, 1992; Bearhop et al., 2003).

Como os tecidos integram as dietas dos consumidores em diferentes escalas de tempo, análises isotópicas de múltiplos tecidos podem fornecer informações sobre a especialização e/ou oportunismo da dieta à medida que a disponibilidade de recursos muda temporalmente. Martínez del Rio et al. (2009) compararam a variação intrapopulacional da dieta de três espécies de *Cinclodes* sp (*C. oustaleti*, *C. patagonicus* e *C. nigrofumosus*) que apresentaram uma singularidade sazonal da dieta, conforme inferido pelos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ ao comparar os valores de tecidos referente a dieta do inverno (i.e., fígado e músculo) e verão (i.e., penas). Os indivíduos de *C. oustaleti* foram considerados generalistas, pois os valores isotópicos diferiram entre os tecidos referentes ao inverno e verão. *C. patagonicus* incluiu indivíduos especialistas e generalistas, já que os valores isotópicos entre tecidos do inverno e verão foram similares para parte dos indivíduos, enquanto variou para outros. Finalmente, *C. nigrofumosus* eram especialistas, pois os valores isotópicos foram semelhantes entre todos os indivíduos. (Martínez del Rio et al., 2009).

Alguns estudos consideraram diferentes tecidos para inferir como diferentes grupos exploram os recursos alimentares ao longo do tempo. Por exemplo, em um estudo com diferentes guildas de forrageamento de aves que ocorrem manguezais na Austrália, Buelow et al. (2018) utilizaram garra e sangue para inferir como as guildas forrageiam em duas localidades: Cocoa creek e Healy creek. Em Cocoa creek, o espaço isotópico da garra revelou que todas as guildas de forrageamento tinham uma dieta mais diversificada em relação ao

espaço isotópico do sangue, o que indica mudanças temporais da dieta à medida que a disponibilidade de recursos muda sazonalmente. Já na segunda área, Healy creek, o espaço isotópico de sangue e garras eram semelhantes, sugerindo uma baixa probabilidade de variação temporal da dieta nos grupos de forrageamento na estação chuvosa em florestas de mangue (Buelow et al., 2018). Guaraldo et al. (2019) investigaram a variação do espaço isotópico de indivíduos residentes de *Elaenia cristata* ao longo do ano (período reprodutivo, de muda e não reprodução) usando de diferentes tecidos. O espaço isotópico analisado a partir dos valores isotópicos das penas mostrou uma maior diversidade da dieta devido a maior disponibilidade de recursos alimentares durante a muda. No período não reprodutivo, o espaço isotópico (analisado com valores isotópicos de garra) sugeriu uma dieta baseada em alimentos de baixo nível trófico. Já no período reprodutivo, o espaço isotópico (analisado com valores isotópicos de sangue) mostrou padrões de dieta intermediário em relação aos outros períodos (Guaraldo et al., 2019). Esses estudos, por sua vez, mostram que o uso de múltiplos tecidos se mostra promissor para elucidar padrões de dieta em escala espacial e temporal quanto a exploração de recursos alimentares.

4. Material & Métodos

4.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido na Fazenda Tabapuã dos Pirineus (15°46'40" S, 48°49'22" W, elev. 1100m), uma propriedade rural de 800 ha que está inserida na bacia do Alto Corumbá localizada no município de Cocalzinho de Goiás, Goiás, Brasil (Figura 1). Na bacia do Alto Corumbá, predominam as fitofisionomias campestres, cerrado sentido restrito e mata ripária ao longo dos riachos preservados (Figura 1). Grande parte da vegetação nativa está inserida no Parque Estadual da Serra dos Pirineus que corresponde a uma área total de 2822 ha (Pinto et al., 2009; Cordeiro et al., 2020). Em áreas manejadas, há locais de cultivo agrícola como milho e soja, mas principalmente pastagem com gramíneas exóticas (Cordeiro et al., 2020; Figura 1). No período estudado, a precipitação média anual foi de 1415 mm e a temperatura média anual foi de 21,9 °C (INMET, 2024). O clima local é classificado como Aw de Köppen, caracterizado por duas estações distintas bem demarcadas: uma estação seca de maio a setembro, com média mensal inferior a 50 mm e uma estação chuvosa de outubro a abril, chegando a 250 mm nos meses de dezembro e janeiro (ANA, 2024).

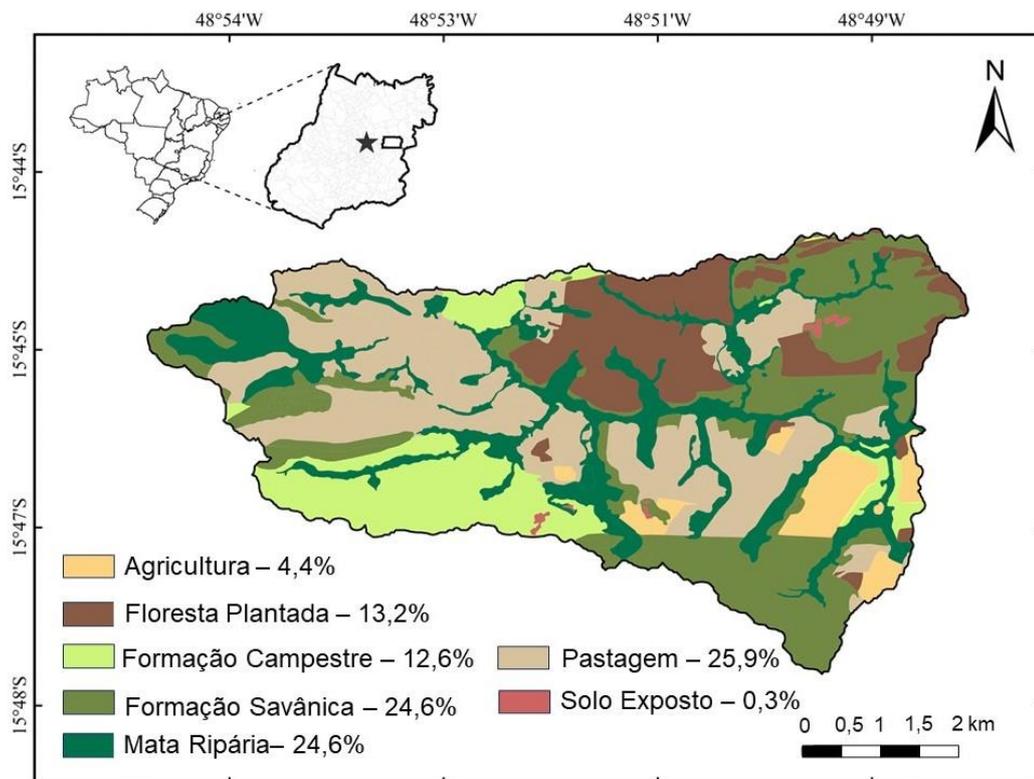


Figura 1. Mapa que caracteriza a heterogeneidade do uso e cobertura vegetal da bacia do Alto Corumbá, onde está inserida a fazenda Tabapuã dos Pirineus, município de Cocalzinho de Goiás, GO (adaptado de Cordeiro et al. 2020).

4.2 Espécie estudada

O canário-da-terra (*Sicalis flaveola*) é uma espécie que apresenta preferência por ambientes abertos como bordas de floresta e pastagens (Palmeiro & Massoni, 2009). Forrageia no solo, podem comer pequenos artrópodes, mas tem uma dieta predominantemente granívora (Rising & Jaramillo, 2024). É uma espécie social que forma bandos quando não está no período reprodutivo (Sick, 1997; Silveira & Mendes, 1999). Durante o período reprodutivo, formam casais socialmente monogâmicos (Salvador-Bernítez et al., 2022) que nidificam com sucesso em troncos de árvores, construções humanas (e.g., telhados) e ninhos abandonados de outras espécies (e.g., *Furnarius rufus*) (Sick, 1997; Palmeiro & Massoni, 2009).

A subespécie *sicalis flaveola brasiliensis* apresenta atraso na maturação da plumagem (Marques-Santos et al., 2018), na qual fêmeas e machos podem se reproduzir sem adquirir a plumagem definitiva (Espinosa et al., 2017). Os indivíduos jovens (juvenis do primeiro ano e sub-adultos) apresentam uma plumagem parda e podem apresentar um colar amarelo na região do peito (Figura 2A). Apenas após o segundo período reprodutivo os machos começam a desenvolver uma plumagem definitiva amarela com uma frente característica alaranjada (Marques-Santos et al., 2018; Figura 2B). As fêmeas desenvolvem uma plumagem definitiva amarela mais escura e homogênea a partir do segundo ou terceiro período reprodutivo (Silveira & Méndez, 1999; Marques-Santos et al., 2018; Figura 2C). Os indivíduos de *S. f. brasiliensis* aqui capturados foram classificados como fêmeas amarelas - fêmeas adultas que exibem plumagem amarela; machos amarelos - machos adultos que exibem plumagem amarela; e pardos - juvenis ou sub-adultos de ambos os sexos que exibem plumagem parda.

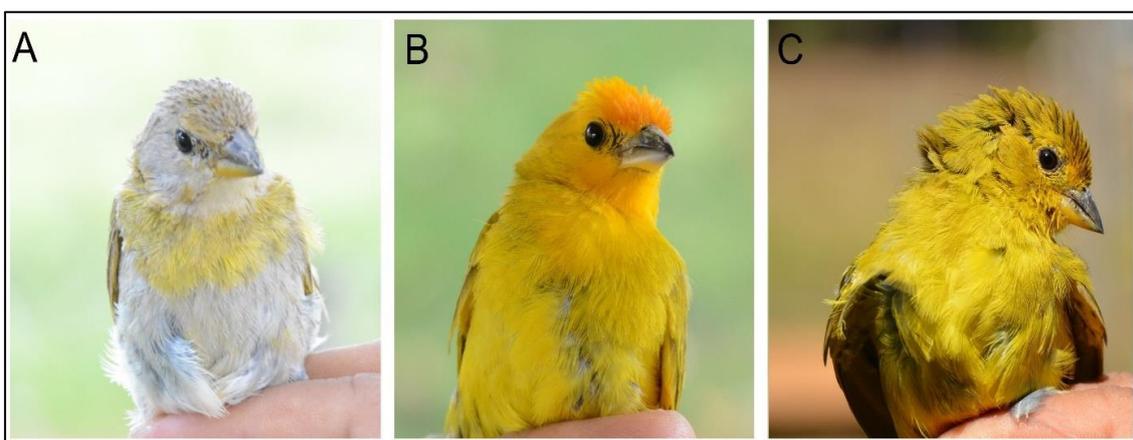


Figura 2: (A) Indivíduo representativo de canário-da-terra jovem ou sub-adulto que expressa uma plumagem parda. (B) Macho adulto representativo com uma plumagem definitiva amarela com uma frente característica alaranjada. (C) Fêmea adulta representativa com uma plumagem definitiva amarela. Crédito das fotos: Projeto Forense Capes.

4.3 Capturas das Aves e Tecidos Amostrados

As campanhas de campo foram parte do projeto Origem realizadas a cada dois meses entre janeiro de 2017 e março de 2018. Além disso, as campanhas foram realizadas sempre no início de cada mês. No total, 195 indivíduos de *S.f. brasiliensis* (18 fêmeas amarelas, 44 machos amarelos e 133 pardos) foram capturados com o uso de redes-de-neblina (12x3m). As redes-de-neblina foram montadas em áreas de campo aberto próximo aos locais de pastagem no início da manhã, onde permaneceram até o fim da tarde em cada campanha. Não foi usado nenhum playback co-específico para atrair as aves para as rede-de-neblina. Os indivíduos que foram capturados receberam anilhas metálicas fornecidas pelo CEMAVE (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Aves Silvestres). Posteriormente, cerca de 100 μ L de sangue foram coletados via punção venosa braquial e depositado em uma lâmina de vidro para ser seca ao ar. Penas inteiras da asa (pena mais primária mais externa – P9), cauda (segunda pena mais externa - R2) e um pool de penas da frente e peito (Figura 3), com o número de tecidos amostrados em um mesmo indivíduo que variou durante as campanhas de campo (Tabela 1). Já que a coleta de múltiplos tecidos em um mesmo indivíduo poderia potencialmente causar um maior *stress*, e, portanto, alguns indivíduos foram liberados mais cedo devido a restrições logísticas de campo, quando houve simultaneamente uma elevada taxa de captura. As penas coletadas da asa e cauda foram guardadas em sacos plásticos contendo uma identificação individual. Penas do peito e frente de machos amarelos configuram a parte do corpo com uma coloração mais visível para outros indivíduos durante as exibições e podem ter papéis importantes na sinalização social e sexual (Shultz & Burns 2017; Cruz-Bernate et al., 2023). Essas penas foram fixadas em papel cartão com fita adesiva e embaladas em folha de alumínio. Na tabela 1, está descrito as análises isotópicas de cada categoria e tipo de tecido analisado (asa, cauda, frente e peito, e o sangue).

O sangue foi usado para inferir a variação temporal da dieta nos indivíduos pardos (P), fêmeas amarelas (FA) e machos amarelos (MA) por ser um tecido de rápida renovação. Como o período de integração dos valores isotópicos da dieta no sangue para pequenos passeriformes corresponde a aproximadamente 30 dias (Hobson & Clarck, 1992; Bearhop et al., 2002), a informação dietética dos indivíduos capturados corresponde ao período aproximado antes da coleta. Já os valores isotópicos da razão isotópica de Carbono e Nitrogênio das penas foram utilizados para inferir uma singularidade da dieta a longo prazo, uma vez que reflete a dieta durante o período de formação da pena e o processo de muda ocorre anualmente (Blight et al., 2015; Navarro et al., 2022). Para o canário-da-terra, o processo de muda das penas da cauda e

corpo abrange um período mais prolongado e pouco estruturados, ou seja, ocorre durante todo ao ano (Costa et al., 2022). Apenas as penas da asa de indivíduos amarelos (fêmeas e machos adultos) mantêm um em período consistente de muda após a estação reprodutiva (maio-julho; Costa et al., 2022). As diferentes penas coletadas foram usadas para inferir o fracionamento tecidual entre cada tipo de pena e sangue a fim de verificar a consistência individual da dieta entre as categorias. Os valores isotópicos das penas da frente e peito que apresentam uma coloração mais vibrante e característica da deposição de pigmentos carotenoides devem inferir a fonte de aquisição dos pigmentos carotenoides, uma vez que análises colorimétricas correspondem as mesmas penas.

Os procedimentos aqui descritos foram aprovados pelo Comitê de ética e uso animal – Universidade de Brasília (aprovação N° 55712/2016). As licenças de coleta de campo foram permitidas pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (SISBIO N° 8745-1) e uso genético pelo Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e Licença da Associação do Conhecimento Tradicional (SISGEN N°A018ECD).

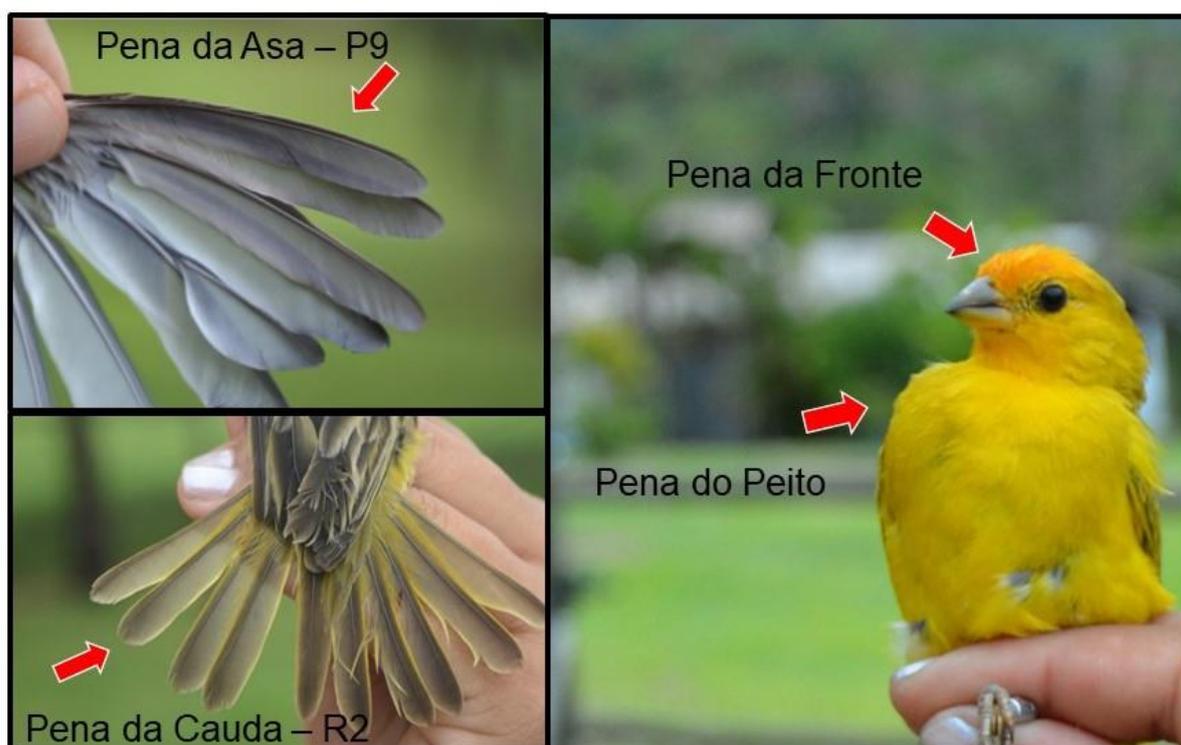


Figura 3. A seta vermelha indica a localização de cada tipo de pena amostrada em todas as categorias de canário-da-terra. Crédito das fotos: Projeto Forense Capes.

Tabela 1. Número de indivíduos de canários-da-terra capturados e analisados em cada amostragem de campo entre janeiro de 2017 e março de 2018 como parte do projeto Origem na fazenda Tabapuã dos Pireneus, no Município de Cocalzinho do Goiás, GO, Brasil. A quantidade de amostras que foram analisadas quanto ao $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ referente ao sangue e aos diferentes tipos de pena (asa, cauda, frente e peito). FA = fêmeas amarelas; MA = machos amarelos e P = pardos.

Mês de amostragem	Ano	Capturados		Analisados			
		FA-MA-P	Sangue	Asa	Cauda	Frente	Peito
			FA-MA-P	FA-MA-P	FA-MA-P	FA-MA-P	FA-MA-P
Janeiro	2017	4-6-8	3-6-8	0-0-0	3-5-7	0-0-0	0-0-2
Março	2017	3-9-25	3-9-25	3-8-13	2-8-18	2-9-18	3-9-24
Maió	2017	3-3-39	3-3-12	3-3-15	3-2-14	0-0-0	3-2-30
Julho	2017	2-6-14	2-5-6	2-5-8	2-6-8	1-6-5	2-4-4
Outubro	2017	1-4-12	1-4-10	1-4-12	0-0-0	0-3-0	1-3-0
Dezembro	2017	2-6-22	2-5-8	2-6-8	0-1-1	2-5-0	3-5-0
Março	2018	3-10-13	2-7-8	3-7-8	0-0-0	1-5-0	2-6-0
Total		18-44-133	16-39-77	14-33-64	10-22-48	6-28-23	14-29-60

4. 4 Análises Colorimétricas

A coloração das penas da frente e peito dos machos amarelos ($N = 26$) foram analisadas quanto à reflectância dentro do espectro visual das aves (300-700 nm) e posteriormente foram levadas as análises isotópicas (próxima seção). Para isso, foi utilizado um espectrofotômetro Ocean View FLAME (Ocean View, Dunedin, FL, USA) acoplado uma fonte de luz pulsante PX-2 Xenon (Ocean View, Dunedin, FL, USA). A luz é transmitida por uma sonda de fibra óptica bifurcada (Ocean View, Dunedin, FL, USA) que fornece a iluminação da fonte de luz e transfere a luz refletida de volta ao espectrofotômetro. As medidas de reflectância foram padronizadas com o padrão branco Ocean View e uma fita de superfície escura como referência para o preto. As penas foram sobrepostas na mesma orientação, simulando o seu posicionamento como visto na ave. Por não se tratar de penas iridescentes, a sonda foi mantida em um ângulo de 45° em relação a superfície da pena com um suporte que bloqueou toda a luz do ambiente. Na região amarelo/laranja da frente e na região amarela das penas do peito passaram a ser realizadas três medições em posições arbitrárias, retirando e reposicionando a sonda, a fim de gerar uma única variável colorimétrica.

Subsequentemente, os dados de reflectância das penas da frente e peito (Figura 4) foram analisados em ambiente R (R Core Team, 2023) para calcular variáveis colorimétricas clássicas (brilho, matiz e saturação; Montgomerie 2006) considerando o espectro visual das aves. Para isso, foi utilizado previamente a função *prospec* do pacote “pavo” (Maia et al., 2013) para suavizar as curvas e para eliminar ruídos e picos locais. A função *aggspec* foi usado para calcular as variáveis colorimétricas de brilho (B2) e saturação (S8). O brilho médio foi calculado como a média de luz refletida em toda faixa do espectro ($R_{300-700}$). A saturação média foi calculada como a proporção da diferença entre a reflectância máxima e mínima dividido pelo brilho ($R_{300-700}/300-700$). A matiz foi calculada como $\arctan([(R_{510-605} - R_{320-415})/R_{320-700}] / [(R_{605-700} - R_{415-510})/R_{320-700}])$ (“H4b” do programa RCLR, Montgomerie, 2008). A matiz é uma variável colorimétrica calculada por meio de segmento de classificação para contabilizar a proporção de luz refletida em diferentes regiões do espectro (Saks et al., 2003). Altos valores indicam comprimentos de ondas mais curtos (amarelo), enquanto valores mais baixos indicam comprimentos de onda mais longos (vermelho). As variáveis matiz e saturação são intimamente ligadas ao conteúdo de carotenoides incorporados na dieta (Saks et al., 2003, Montgomerie, 2006), e assim podem fornecer informações sobre a fonte de aquisição dos carotenoides.

Essas métricas de cores selecionadas seguem estudos anteriores com aves que refletem UV e possuem uma coloração a base de carotenoides (Sparrow et al., 2017; Carvalho 2022; Mahoney et al., 2022), incluindo estudos com o canário-da-terra (Saldívar & Massoni 2018; Araújo-Silva et al., 2023; Cruz-Bernate et al., 2023).

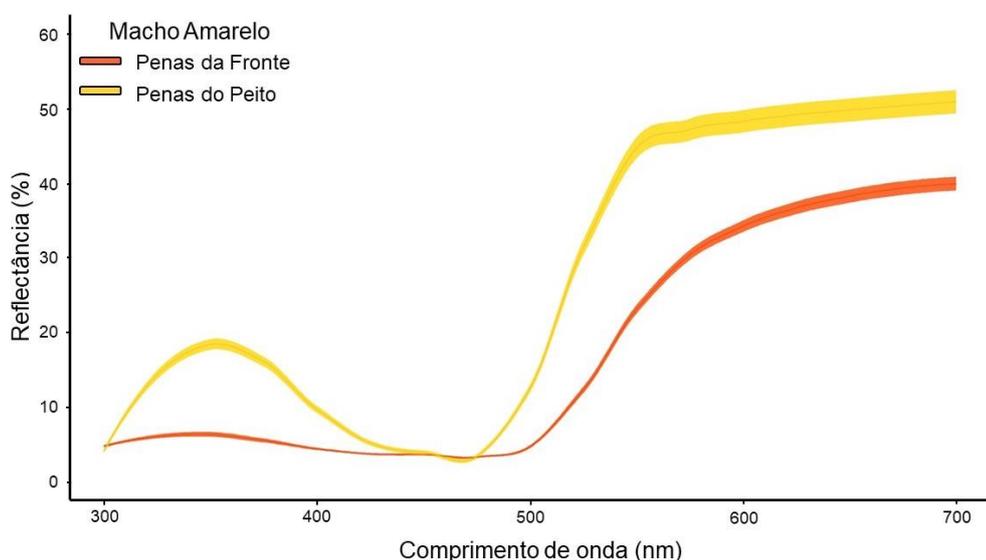


Figura 4. Gráficos de reflectância mostrando a porcentagem (média \pm desvio padrão) de luz refletida nas penas da frente e peito dos machos amarelos.

4.5 Análises de Isótopos Estáveis

As amostras de pena (asa, cauda, corpo e frente) foram previamente limpas com água destilada e posteriormente com uma solução de proporção 2:1 de clorofórmio e metanol. Em seguida, as amostras de pena foram secas em uma estufa a 50° C durante 24 horas. Após esse processo, cada amostra de pena foi fragmentada na região distal do vexilo. Todas as amostras foram pesadas para corresponderem à massa mínima para a análise (0,5 mg), e em seguida encapsuladas em cápsula de estanho.

As amostras de sangue, que estavam armazenadas em lâminas de vidro e mantidas secas a temperatura ambiente, foram removidas diretamente da lâmina a fino pó com uma espátula. Estas amostras foram pesadas para corresponderem a massa mínima para a análise (0,5 mg), e em seguida encapsuladas em cápsula de estanho.

As razões isotópicas de carbono e nitrogênio foram determinadas por combustão usando um analisador elementar (Carlo Erba, CHN-1100) acoplado a um Espectrofotômetro de massa Thermo Finnigan DELTA Plus no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), da Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.

O cálculo de razão isotópica (R) considera a relação do isótopo mais leve com o mais pesado. A notação delta (δ) é utilizada para descrever a razão isotópica de uma amostra como partes *per mil* (‰), seguindo a equação $\delta X = [(R_{\text{amostra}} / R_{\text{padrão}}) - 1] \times 1000$, onde δX é a razão isotópica; R_{amostra} e $R_{\text{padrão}}$ representam a razão isotópica da amostra e um determinado padrão, respectivamente.

O padrão usado para a análise de carbono foi Vienna Pee Dee Belemite (Vienna PDB; relação $^{13}\text{C}:^{12}\text{C} = 0,01118$), e o padrão usado para análise de nitrogênio foi o ar atmosférico (relação $^{15}\text{N}:^{14}\text{N} = 0,0036765$). O padrão interno, folha de cana-de-açúcar, foi intercalado com as amostras teciduais durante as análises. O erro analítico de longo prazo para o padrão interno é de 0,2‰ tanto para $\delta^{13}\text{C}$ como $\delta^{15}\text{N}$.

4. 6 Análises Estatísticas

Todas as análises estatísticas foram realizadas em R (R Core Team, 2023) e todos os testes realizados procederam após a verificação dos pressupostos de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (teste de Levene) dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ referentes ao sangue e às diferentes penas.

Como o sangue de indivíduos de canário-da-terra foi coletado a cada dois meses dentro de um período de um ano e o período de renovação total do sangue é estimado em cerca de um mês para passeriformes (Hobson & Clark, 1992; Bearhop et al., 2002), cada mês amostrado foi considerado como uma variável temporal independente. Os valores isotópicos das categorias e mensais do sangue não seguiram uma distribuição normal, desta forma, o teste de Kruskal-wallis foi aplicado para verificar diferenças nos valores isotópicos entre as categorias e de cada categoria ao longo dos meses de amostragem e comparar entre as categorias em cada mês amostrado. Para verificar eventuais variações mensais dos valores isotópicos, foi aplicado o teste de Wilcoxon para comparações pareadas.

Os valores isotópicos das diferentes penas (asa, cauda, frente e peito) também não seguiram uma distribuição normal, e, portanto, o teste de Kruskal Wallis foi utilizado para identificar as diferenças dos valores isotópicos das diferentes penas entre cada categoria, e, cada tipo de pena entre as categorias. O teste de Wilcoxon foi aplicado para comparações pareadas quando identificado variações dos valores isotópicos das diferentes penas entre e dentro as categorias, respectivamente.

O teste de Wilcoxon para comparações pareadas foi também usado para verificar diferenças da dieta entre pena e sangue, comparando os valores isotópicos de cada tipo de pena com o sangue do mesmo indivíduo.

Foi utilizado o pacote “SIBER” (Jackson et al., 2011) para estimar as diferenças no uso de recursos e na largura do nicho entre as classes de cor da plumagem de canário-da-terra. Consideramos 95% dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das penas da asa para calcular a Área de Elipse Padrão (SEA), uma medida do espaço do nicho isotópico que considera a posição do nicho ocupada em um espaço bidimensional. Isso nos permite avaliar a diversidade da dieta das classes de cor da plumagem do canário-da-terra. Adicionalmente, comparamos o SEA entre as classes de cor da plumagem utilizando uma abordagem de inferência bayesiana (SEA_B; em %2), uma estimativa da largura do nicho, que reflete a variabilidade da dieta entre as categorias, de modo que fornece informações sobre a quão generalizada ou especializada é a dieta de cada classe de cor da plumagem de canário-da-terra. O SEA_B foi calculado em 10,000 interações pelo método MCMC para gerar intervalos de credibilidade bayesianos de 50, 75 e 95%.

Em seguida, utilizamos o pacote “nicheROVER” (Swanson et al., 2015) para calcular a probabilidade de sobreposição do espaço do nicho isotópico com base nos valores isotópicos das penas da asa entre as categorias. Esse pacote considera a probabilidade de a amplitude do nicho de um grupo ser incorporada em relação a outro grupo (Swanson et al., 2015). Isso nos permite avaliar a probabilidade de similaridade da dieta entre as categorias e, portanto, o grau em que os indivíduos podem estar competindo por recursos. Para isso, a sobreposição de nicho foi estimada ao executar 1.000 iterações pelo método de MCMC dos valores isotópicos para calcular as regiões de sobreposição do nicho com um nível de probabilidade de alfa = 0,95 (i.e., 95% de probabilidade) e intervalos de credibilidade de 95%.

Foram realizados testes de correlação de Spearman para examinar a relação entre a dieta, conforme inferido pelos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, com as variáveis colorimétricas clássicas de brilho, matiz e saturação das penas da frente e peito amostrado nos mesmos 26 machos amarelos adultos. Não foram realizadas estas correlações para fêmeas amarelas pois o número de amostras de penas da frente e peito para os mesmos indivíduos foram muito baixo (N=4).

5. RESULTADOS

5.1 Variação Temporal de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no Sangue de Indivíduos de Canário-da-terra

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do sangue não diferiram entre fêmeas amarelas, machos amarelos e indivíduos pardos (Kruskal Wallis $H = 0,007$; $df = 2$; $p = 0,99$). Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do sangue (média \pm desvio padrão) das fêmeas amarelas, machos amarelos e indivíduos pardos foram $-12,1 \pm 1,1\%$, $-12,1 \pm 1,5\%$ e $-12 \pm 1,1\%$, respectivamente.

As fêmeas amarelas não diferiram os valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre os meses de amostragem (Kruskal Wallis $H = 8,27$; $df = 6$; $p = 0,21$; Figura 5A). Já os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do sangue dos machos amarelos diferiram entre os meses de amostragem com uma variação entre $-11,3\%$ a $-13,2\%$ (Kruskal Wallis $H = 18,5$; $df = 6$; $p = 0,0004$; Tabela 2; Figura 5B), e da mesma forma, os indivíduos pardos diferiram o $\delta^{13}\text{C}$ entre os meses com uma variação entre $-11,5\%$ e $-13,7\%$ (Kruskal Wallis $H = 36,35$; $df = 6$, $p < 0,0001$; Tabela 2; Figura 5C).

Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do sangue não diferiram entre as categorias de cor da plumagem, (Kruskal Wallis $H = 0,77$; $df = 2$; $p = 0,67$). Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ (média \pm desvio padrão) do sangue das fêmeas amarelas, machos amarelos e indivíduos pardos foram $5,8 \pm 0,6\%$, $5,8 \pm 0,8\%$, e $5,6 \pm 1\%$, respectivamente.

Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do sangue não diferiram entre os meses de amostragem para fêmeas amarelas (Kruskal Wallis $H = 7,02$; $df = 6$; $p = 0,31$; Figura 6A) e machos amarelos (Kruskal Wallis $H = 11,95$; $df = 6$; $p = 0,06$; Figura 6B). Ambas as categorias compartilharam valores médios similares (fêmeas amarelas = $5,8 \pm 0,6\%$, machos amarelos = $5,8 \pm 0,8\%$). O $\delta^{15}\text{N}$ do sangue de indivíduos pardos diferiu significativamente entre os meses de amostragem (Kruskal Wallis $H = 11,95$, $df = 6$; $p < 0,0001$) com média de $5,6 \pm 1,0\%$ e uma variação de $3,8\%$ a $6,7\%$. As comparações pareadas com o teste de Wilcoxon entre os meses mostraram que o $\delta^{15}\text{N}$ do sangue em outubro de 2017 foi significativamente menor em comparação aos outros meses em cerca de 3% , e entre os outros meses, variaram entre $5,5\%$ e $6,7\%$ (Tabela 2; Figura 6C).

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do sangue em outubro variaram significativamente entre as categorias (Tabela 3). O teste pareado de Wilcoxon mostrou que para o $\delta^{13}\text{C}$ do sangue, as fêmeas amarelas não diferiram os valores com os machos amarelos ($p = 0,50$) e com os indivíduos pardos ($p = 0,16$), mas os machos amarelos apresentaram, em média, valores de 1% maior em comparação aos indivíduos pardos ($p = 0,005$). Para os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do sangue, as fêmeas amarelas também não diferiram, com os machos amarelos ($p = 1$) e indivíduos pardos ($p = 0,16$), mas os machos amarelos, por sua vez, apresentaram valores médios de $2,1\%$ maior em comparação aos indivíduos pardos ($p = 0,005$).

Tabela 2. Valor de p do teste post-hoc não paramétrico de Wilcoxon dos entre os meses de amostragem (janeiro, março, maio, julho, outubro e dezembro - 2017 e março - 2018) quanto aos valores de $\delta^{13}\text{C}$ para machos amarelos e indivíduos pardos e, para os valores de $\delta^{15}\text{N}$ dos indivíduos pardos referentes ao sangue. O símbolo (*) indica a significância estatística.

Machos Amarelos - $\delta^{13}\text{C}$						
	Jan/2017	Mar/2017	Mai/2017	Jul/2017	Out/2017	Dez/2017
Mar/2017	0,40	-	-	-	-	-
Mai/2017	0,09	0,60	-	-	-	-
Jul/2017	0,41	0,14	0,25	-	-	-
Out/2017	0,02*	0,06	0,10	0,14	-	-
Dez/2017	0,11	0,01*	0,03*	1,00	0,25	-
Mar/2018	0,03*	0,14	0,66	0,01*	0,01*	0,0005*
Pardos - $\delta^{13}\text{C}$						
	Jan/2017	Mar/2017	Mai/2017	Jul/2017	Out/2017	Dez/2017
Mar/2017	0,004*	-	-	-	-	-
Mai/2017	0,04*	0,04*	-	-	-	-
Jul/2017	0,94	0,008*	0,06	-	-	-
Out/2017	0,14	0,003*	0,006*	0,19	-	-
Dez/2017	0,004*	<0,0002*	0,0002*	0,001*	0,005*	-
Mar/2018	0,02*	0,44	0,46	0,03*	0,006*	0,0001*
Pardos - $\delta^{15}\text{N}$						
	Jan/2017	Mar/2017	Mai/2017	Jul/2017	Out/2017	Dez/2017
Mar/2017	0,98	-	-	-	-	-
Mai/2017	0,18	0,03*	-	-	-	-
Jul/2017	0,94	0,98	0,18	-	-	-
Out/2017	<0,0001*	<0,0001*	<0,0001*	<0,0001*	-	-
Dez/2017	0,03*	0,009*	0,002*	0,07	<0,0001*	-
Mar/2018	0,23	0,23	0,02*	0,41	<0,0001*	0,32

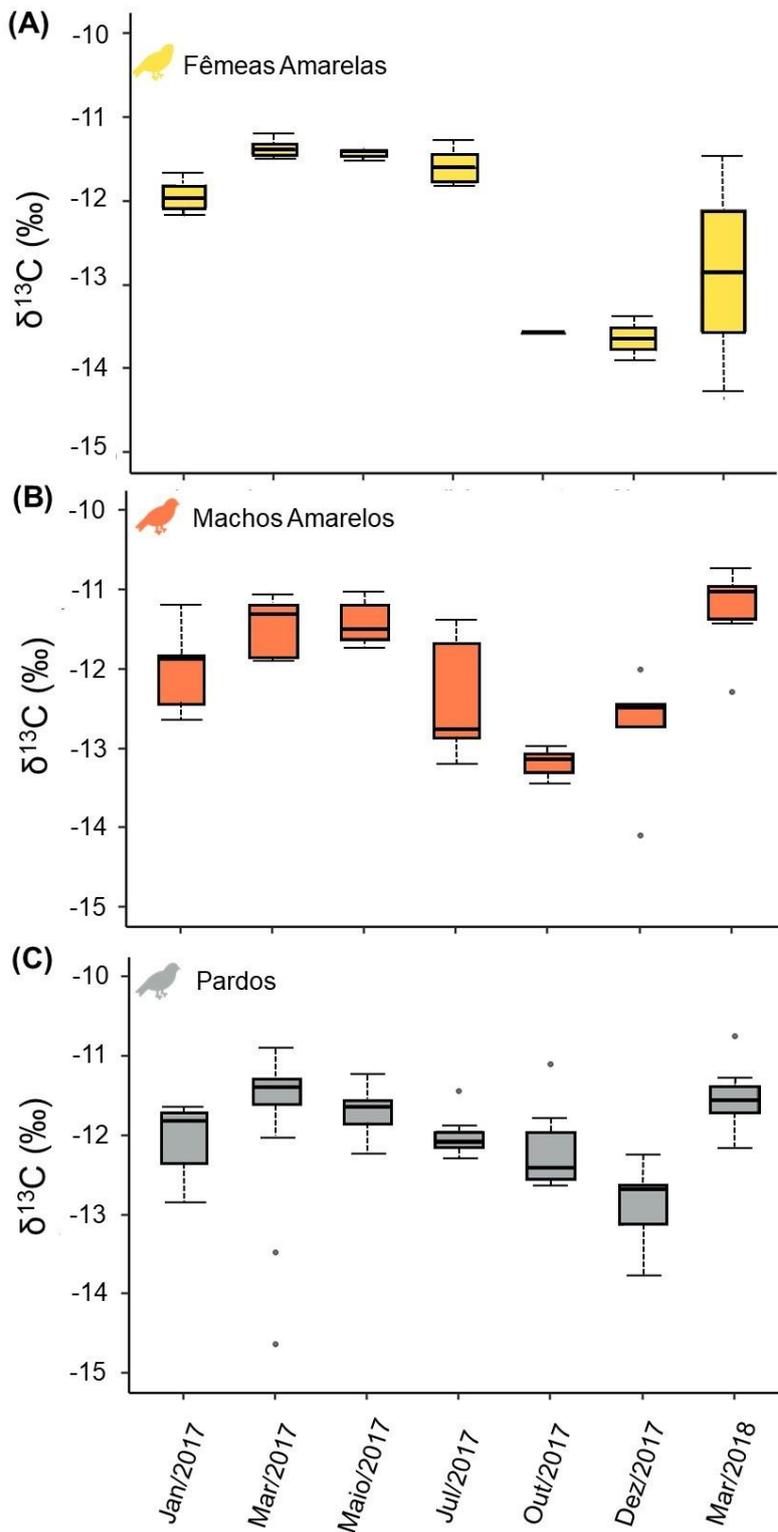


Figura 5. Variação de $\delta^{13}\text{C}$ do sangue ao longo dos meses para fêmeas amarelas (em amarelo; A), machos amarelos (em laranja; B) e pardos (em cinza; C). A linha central exibe a mediana, a parte inferior e superior da caixa da caixa são o primeiro e quarto quartil.

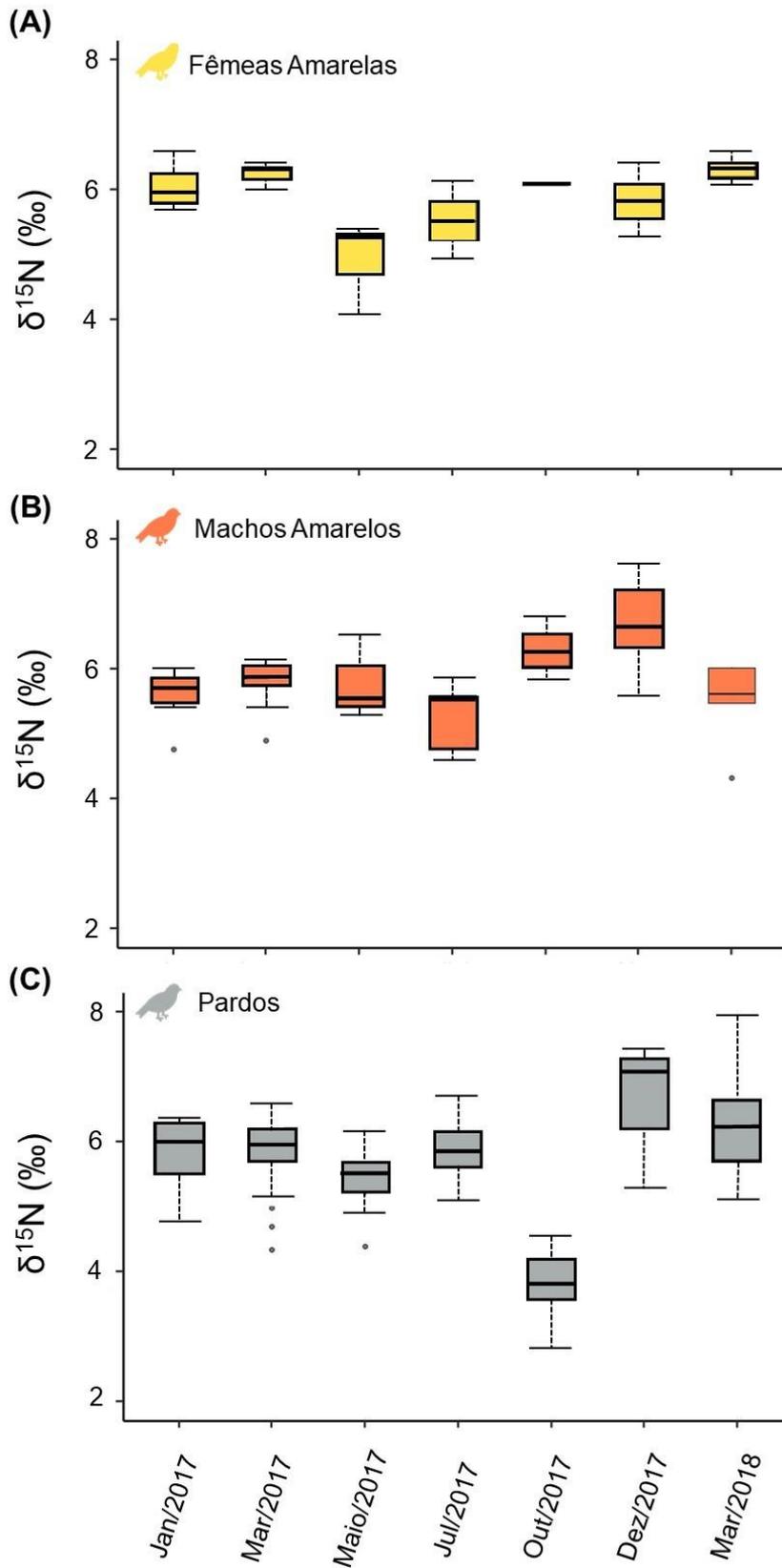


Figura 6. Variação de $\delta^{15}\text{N}$ do sangue ao longo dos meses para fêmeas amarelas (em amarelo; A), machos amarelos (em laranja; B) e pardos (em cinza; C). A linha central exibe a mediana, a parte inferior e superior da caixa da caixa são o primeiro e quarto quartil.

Tabela 3. Variação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (Média \pm desvio padrão) do sangue entre as categorias (fêmeas amarelas, machos amarelos e pardos) para cada mês amostrado. Cada linha da tabela representa as comparações realizadas pelo teste de Kruskal Wallis.

Mês de amostragem	Isótopo	Categorias			Kruskall Wallis		
		Fêmeas amarelas	Machos amarelos	Pardos	H	df	P
Janeiro de 2017	$\delta^{13}\text{C}$	-11,9 \pm 0,3	-12,0 \pm 0,5	-12,0 \pm 0,4	0,56	2	0,97
	$\delta^{15}\text{N}$	6,1 \pm 0,4	5,6 \pm 0,4	5,8 \pm 0,6	2,06	2	0,35
Março de 2017	$\delta^{13}\text{C}$	-11,3 \pm 0,1	-12,3 \pm 2,5	-11,6 \pm 0,8	0,04	2	0,97
	$\delta^{15}\text{N}$	6,2 \pm 0,2	5,8 \pm 0,4	5,8 \pm 0,5	3,06	2	0,21
Mai de 2017	$\delta^{13}\text{C}$	-11,4 \pm 0,08	-11,3 \pm 0,4	-11,7 \pm 0,3	2,94	2	0,22
	$\delta^{15}\text{N}$	4,9 \pm 0,7	5,8 \pm 0,6	5,5 \pm 0,5	3,41	2	0,18
Julho de 2017	$\delta^{13}\text{C}$	-11,6 \pm 0,5	-12,4 \pm 0,8	-12,0 \pm 0,3	2,2	2	0,32
	$\delta^{15}\text{N}$	5,5 \pm 0,8	5,3 \pm 0,5	5,9 \pm 0,5	2,4	2	0,29
Outubro de 2017	$\delta^{13}\text{C}$	-13,6 \pm NA	-13,2 \pm 0,2	-12,2 \pm 0,5	8,4	2	0,01
	$\delta^{15}\text{N}$	6,1 \pm NA	6,3 \pm 0,5	3,8 \pm 0,5	8,26	2	0,01
Dezembro de 2017	$\delta^{13}\text{C}$	-13,6 \pm 0,4	-12,7 \pm 0,8	-13,7 \pm 2,3	2,62	2	0,26
	$\delta^{15}\text{N}$	5,8 \pm 0,7	6,7 \pm 0,8	6,7 \pm 0,8	1,89	2	0,38
Março de 2018	$\delta^{13}\text{C}$	-12,9 \pm 2,1	-11,2 \pm 0,5	-11,5 \pm 0,4	3,37	2	0,18
	$\delta^{15}\text{N}$	6,3 \pm 0,3	5,63 \pm 0,7	6,3 \pm 0,9	3,53	2	0,17

5.2 Variação Tecido – Tecido de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ de Indivíduos de Canário-da-terra

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ não diferiram entre as diferentes penas para fêmeas amarelas (Kruskal Wallis $H = 1,84$; $df = 3$; $p = 0,6$; Figura 7A) com média de $-10,4 \pm 0,7\%$; para machos amarelos (Kruskal Wallis $H = 3,6$; $df = 3$; $p = 0,30$; Figura 7B) com média de $-10,8 \pm 1,4\%$; e indivíduos pardos (Kruskal Wallis $H = 7,5$; $df = 3$; $p = 0,057$; Figura 7C) com média de $-10,3 \pm 1,1\%$.

Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ não diferiram entre as diferentes penas de fêmeas amarelas (Kruskal-Wallis $H = 1,84$; $df = 3$, $p = 0,28$; Figura 8A) com média de $5,8 \pm 0,6\%$, mas diferiram para as penas de machos amarelos (Kruskal Wallis $H = 10,8$; $df = 3$, $p = 0,01$) com média de $5,8 \pm 6\%$ e uma baixa variação de 6% a $6,6\%$. As comparações pareadas mostraram que as penas da frente foram baixas em apenas $0,5\%$ em comparação a penas da asa ($p = 0,1$), cauda ($p = 0,002$) e peito ($p = 0,02$) (Figura 8B). As diferentes penas dos indivíduos pardos não diferiram os valores de $\delta^{15}\text{N}$ (Kruskal Wallis $H = 3,45$; $df = 3$; $p = 0,32$; Figura 8C) com média de $6,2 \pm 1\%$.

As diferenças entre categorias para cada tipo de pena foram descritas na Tabela 4. Apenas os valores de $\delta^{13}\text{C}$ das penas da cauda variaram significativamente entre as categorias. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ da cauda não diferiram entre fêmeas amarelas e indivíduos pardos ($p = 0,05$) e machos amarelos ($p = 0,51$), mas os machos amarelos tiveram, em média, valores $0,8\%$ menores em comparação aos indivíduos pardos ($p = 0,001$; Tabela 4). A distribuição dos isotópicos com a posição de cada indivíduo amostrado de cada categoria com os respectivos valores médios e desvio padrão para cada tipo de pena (asa, cauda, frente e peito) é apresentado na Figura 9.

A diferença dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ entre cada tipo de pena e sangue para os mesmos indivíduos de cada categoria foi descrito na Tabela 5. Em todas as categorias, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ das diferentes penas foram maiores em comparação com o sangue (Tabela 5). Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ das diferentes penas também foram maiores em relação ao sangue, mas com algumas exceções (Tabela 5). As penas da asa de fêmeas amarelas e as penas da frente de todas as categorias não diferiram do sangue (Tabela 5).

A variação média dos valores isotópicos entre cada tipo de pena e sangue foi semelhante entre as categorias, mas variou para cada tipo de pena (Tabela 5). Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ de fêmeas amarelas e machos amarelos variaram entre $1,5$ e $1,8\%$ e entre $1,3$ e $1,5$, enquanto os valores de $\delta^{15}\text{N}$ variaram entre $0,1$ e $1,1\%$ e entre $0,2$ e $0,9\%$ respectivamente. Para os indivíduos pardos, o $\delta^{13}\text{C}$ variou entre 1 e $1,8\%$ e o $\delta^{15}\text{N}$ entre $0,3$ e $0,7\%$.

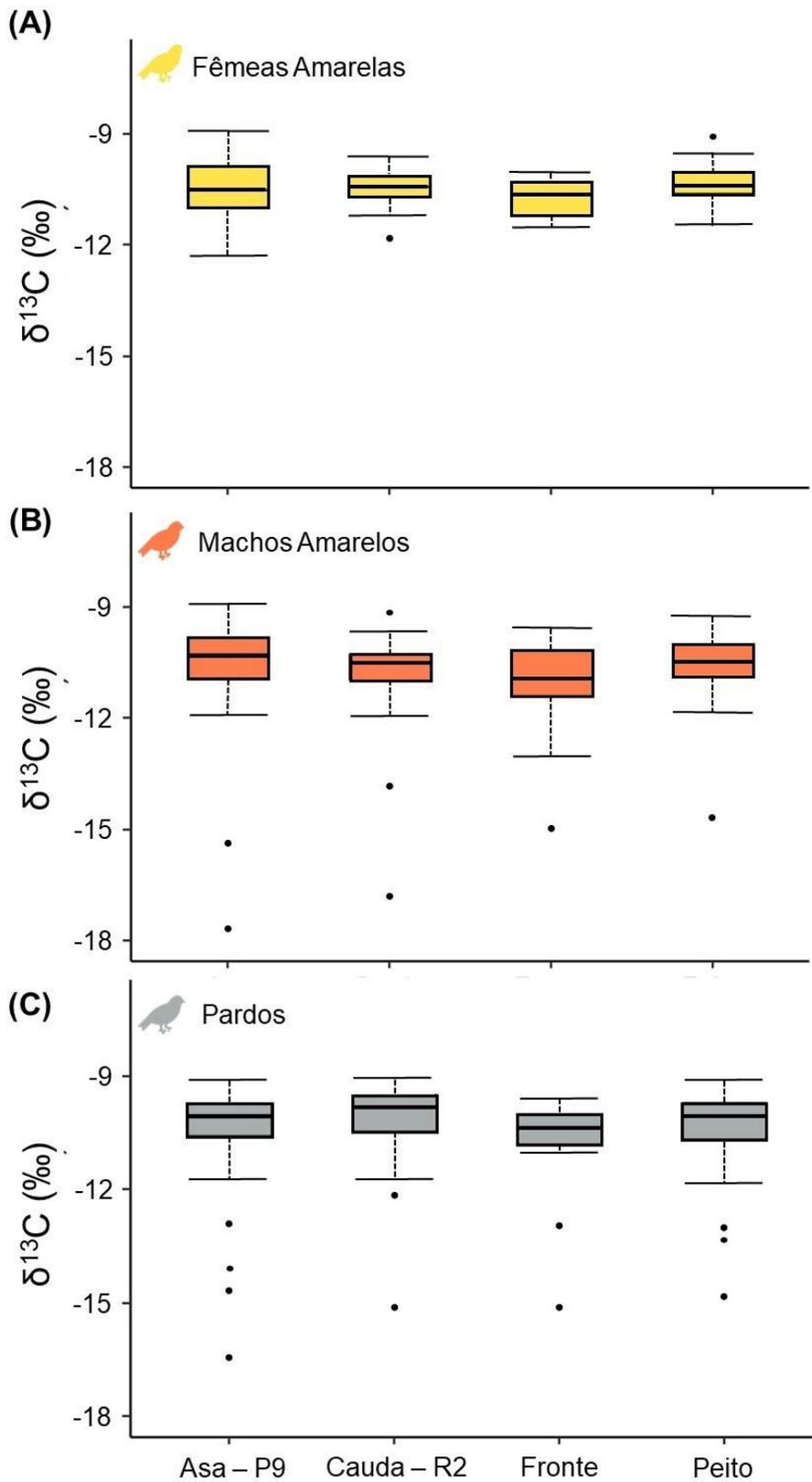


Figura 7. Variação do $\delta^{13}\text{C}$ entre diferentes penas de fêmeas amarelas (em amarelo; A), machos amarelos (em laranja; B) e pardos (em cinza; C). A linha central exibe a mediana, a parte inferior e superior da caixa da caixa são o primeiro e quarto quartil.

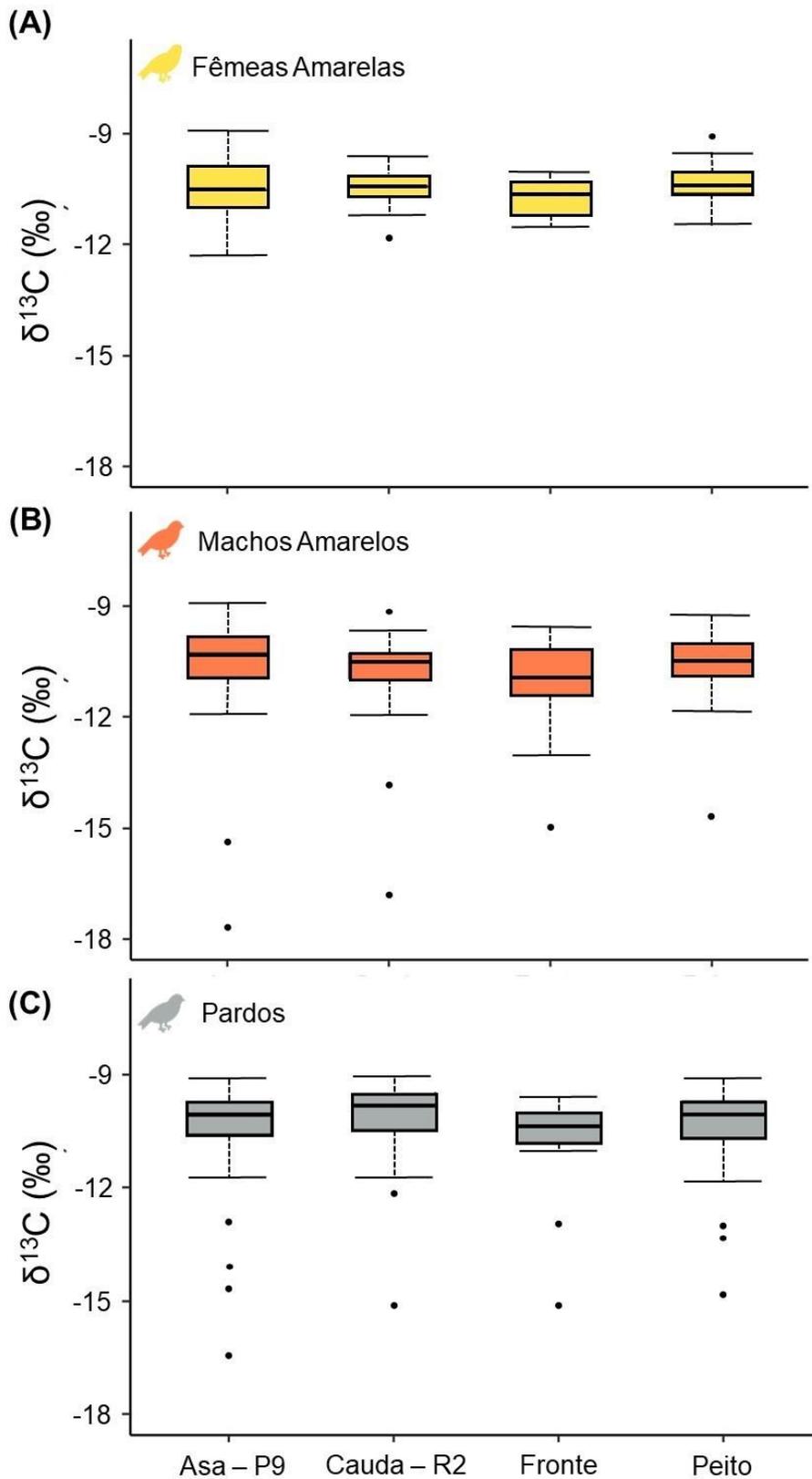


Figura 8. Variação do $\delta^{15}\text{N}$ entre diferentes penas de fêmeas amarelas (em amarelo; A), machos amarelos (em laranja; B) e pardos (em cinza; C). A linha central exibe a mediana, a parte inferior e superior da caixa da caixa são o primeiro e quarto quartil.

Tabela 4. Variação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (Média \pm desvio padrão) das diferentes penas (asa, cauda, fronte e peito) entre as categorias (fêmeas amarelas, machos amarelos e pardos). Cada linha da tabela representa as comparações realizadas pelo teste de Kruskal Wallis.

Tipo de pena	Isótopo	Categorias (‰)			Kruskall Wallis		
		Fêmeas amarelas	Machos amarelos	Pardos	H	df	P
Asa	$\delta^{13}\text{C}$	-10,4 \pm 0,9	-10,7 \pm 1,7	-10,3 \pm 1,3	2,8	2	0,24
	$\delta^{15}\text{N}$	6,3 \pm 1,5	6,4 \pm 1,3	6,1 \pm 0,9	5,4	2	0,07
Cauda	$\delta^{13}\text{C}$	-10,4 \pm 0,6	-10,9 \pm 1,5	-10,1 \pm 1	0,04	2	0,002
	$\delta^{15}\text{N}$	6,5 \pm 0,9	6,6 \pm 1,1	6,2 \pm 0,9	2,6	2	0,27
Fronte	$\delta^{13}\text{C}$	-10,7 \pm 0,6	-10,9 \pm 1,1	-10,6 \pm 1,2	2,8	2	0,23
	$\delta^{15}\text{N}$	5,7 \pm 0,9	6 \pm 0,7	6,2 \pm 0,9	2,4	2	0,3
Peito	$\delta^{13}\text{C}$	-10,6 \pm 1	-10,3 \pm 0,6	-10,3 \pm 1	2,6	2	0,26
	$\delta^{15}\text{N}$	6,4 \pm 0,8	6,3 \pm 1	6,4 \pm 0,9	0,05	2	0,97

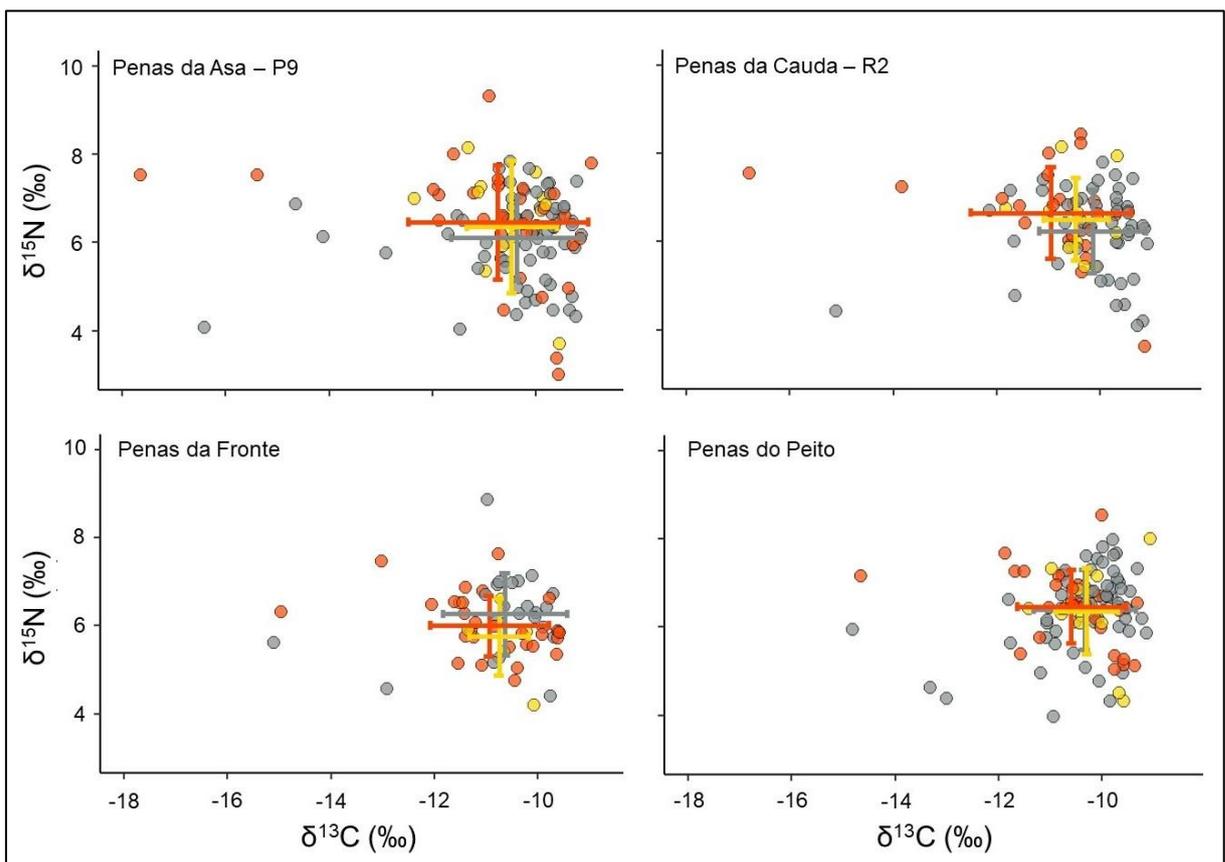


Figura 9. Distribuição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ com a posição de cada indivíduo amostrado da categoria de fêmeas (em amarelo) e machos amarelos (em laranja) e pardos (em cinza), e os valores médios e o desvio padrão para cada tipo de pena (asa, cauda, fronte e peito).

Tabela 5. Variação de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (média \pm desvio padrão) do sangue e diferentes penas (asa, cauda, frente e peito) referente a classes de cor da plumagem: fêmeas e machos amarelos, e indivíduos pardos. Para cada linha da tabela, a diferença pareada indica a diferença dos valores isotópicos entre sangue e pena dos mesmos indivíduos de cada classe, e a comparação pareada indica a significância dessa respectiva diferença.

Classe de cor da plumagem	Tipo de pena (N°)	Isótopo	Sangue (‰)	Pena (‰)	Diferença pareada (‰)	Comparação Pareada
Fêmeas Amarelas	Asa (13)	$\delta^{13}\text{C}$	-12,1 \pm 1,2	-10,3 \pm 0,7	1,8 \pm 1,3	P < 0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,7 \pm 0,7	6,3 \pm 1,5	0,5 \pm 1,7	P = 0.056
	Cauda (9)	$\delta^{13}\text{C}$	- 11,6 \pm 0,3	- 10,5 \pm 0,6	1,1 \pm 0,7	P = 0.001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,5 \pm 0,7	6,6 \pm 0,9	1,1 \pm 1,1	P = 0.01
	Frente (6)	$\delta^{13}\text{C}$	- 12,2 \pm 1,1	-10,7 \pm 0,6	1,5 \pm 1,3	P = 0.02
		$\delta^{15}\text{N}$	5,8 \pm 0,6	5,7 \pm 0,9	0,1 \pm 1	P = 1
	Peito (13)	$\delta^{13}\text{C}$	- 12,1 \pm 1,2	-10,2 \pm 0,5	1,9 \pm 1,3	P<0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,7 \pm 0,7	6,3 \pm 1	0,6 \pm 1,2	P<0.03
Machos Amarelos	Asa (30)	$\delta^{13}\text{C}$	- 12,1 \pm 1,5	-10,7 \pm 1,8	1,4 \pm 2,3	P<0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,9 \pm 0,7	6,5 \pm 1,1	0,6 \pm 1,3	P=0.002
	Cauda (22)	$\delta^{13}\text{C}$	- 12,2 \pm 1,6	-10,9 \pm 1,6	1,3 \pm 2,2	P<0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,7 \pm 0,4	6,6 \pm 1	0,9 \pm 1,1	P<0.0001
	Frente (27)	$\delta^{13}\text{C}$	-12,3 \pm 1,6	-10,9 \pm 1,1	1,4 \pm 1,9	P<0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,8 \pm 0,1	6 \pm 0,7	0,2 \pm 1	P=0.5
	Peito (27)	$\delta^{13}\text{C}$	- 12,2 \pm 1,6	-10,6 \pm 1	1,6 \pm 1,1	P<0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,8 \pm 0,7	6,5 \pm 0,8	0,7 \pm 0,1	P = 0.004
Pardo	Asa (56)	$\delta^{13}\text{C}$	- 12,0 \pm 1,1	-10,4 \pm 1,3	1,8 \pm 0,2	P<0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,6 \pm 1,1	6,0 \pm 0,9	0,4 \pm 1,5	P=0.01
	Cauda (42)	$\delta^{13}\text{C}$	-11,7 \pm 0,1	-10,1 \pm 0,1	1,6 \pm 1,8	P<0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,8 \pm 0,1	6,2 \pm 0,1	0,3 \pm 1,1	P=0.01

Classe de cor da plumagem	Tipo de pena (N°)	Isótopo	Sangue (‰)	Pena (‰)	Diferença pareada (‰)	Comparação Pareada
Pardo	Fronte (22)	$\delta^{13}\text{C}$	-11,7±0,5	-10,7±1	1,0±1,4	P<0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,9±0,5	6,3±1	0,4±1	P=0.06
	Peito (37)	$\delta^{13}\text{C}$	- 11,7±0,7	- 10,4±0,5	1,3±1,3	P<0.0001
		$\delta^{15}\text{N}$	5,7±0,1	6,4±0,1	0,7±1	P<0.0001

5.3 Espaço Isotópico e Sobreposição de Nicho

A posição das elipses no espaço isotópico nos fornece informações sobre a diversidade trófica da dieta, e, portanto, o quão generalista ou especialista é a dieta das classes de cor da plumagem de canário-da-terra. As elipses variaram o tamanho, embora tenham concentrado em uma mesma região do espaço isotópico com alta sobreposição (Figura 10). Mudanças gerais da área das elipses foram ligadas a amplitude do $\delta^{15}\text{N}$, com as fêmeas amarelas e machos amarelos incorporando a área da elipse dos indivíduos pardos (Figura 10). Alguns machos amarelos e indivíduos pardos mostraram capazes de acessar uma fonte alimentar basal alternativa, indicando o acesso a uma mistura de fonte C_3 e C_4 (Figura 10).

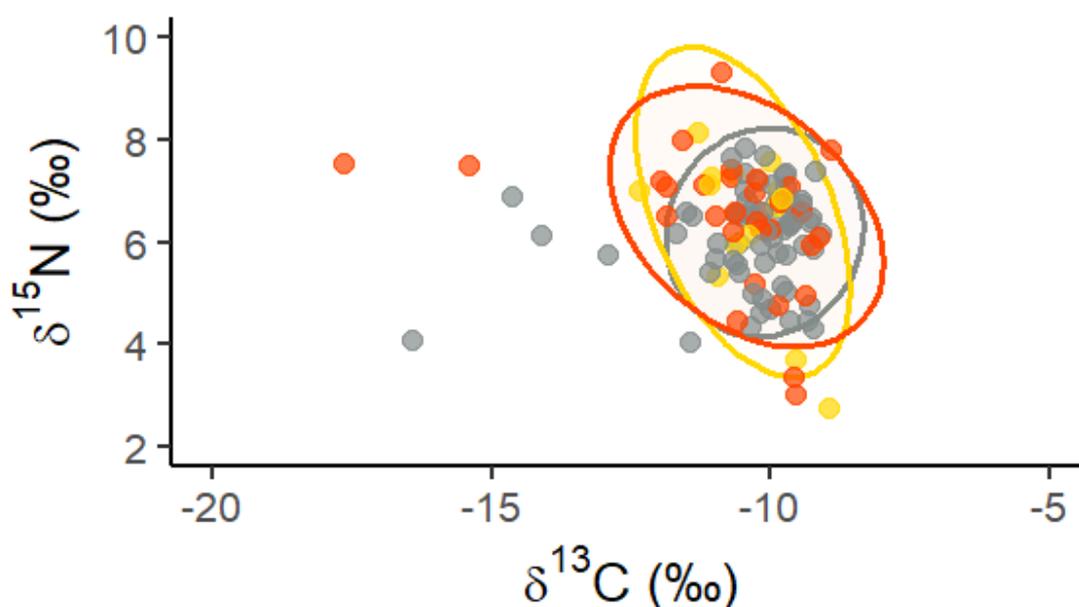


Figura 10. Espaço isotópico das fêmeas amarelas (em amarelo), machos amarelos (em laranja) e indivíduos pardos (em cinza) de canário-da-terra com os valores isotópicos de penas da asa.

A largura do espaço isotópico dos machos amarelos ($6,5\text{‰}^2$) foi 49% maior do que a das fêmeas amarelas ($3,3\text{‰}^2$) e 43,5% maior que a dos indivíduos pardos ($3,7\text{‰}^2$). A comparação entre as áreas da elipse entre as categorias com o SEA_B mostrou o mesmo padrão, com nenhuma sobreposição em 50% e 75% e pouca sobreposição em 95% no intervalo de credibilidade bayesiano em relação as fêmeas amarelas, e nenhuma sobreposição em relação aos indivíduos pardos (Figura 11). Fêmeas amarelas ($3,3\text{‰}^2$) tinham a largura do espaço isotópico 9% menor em comparação aos indivíduos pardos ($3,7\text{‰}^2$), mas com uma elevada sobreposição em 50% no intervalo de credibilidade bayesiano (Figura 11).

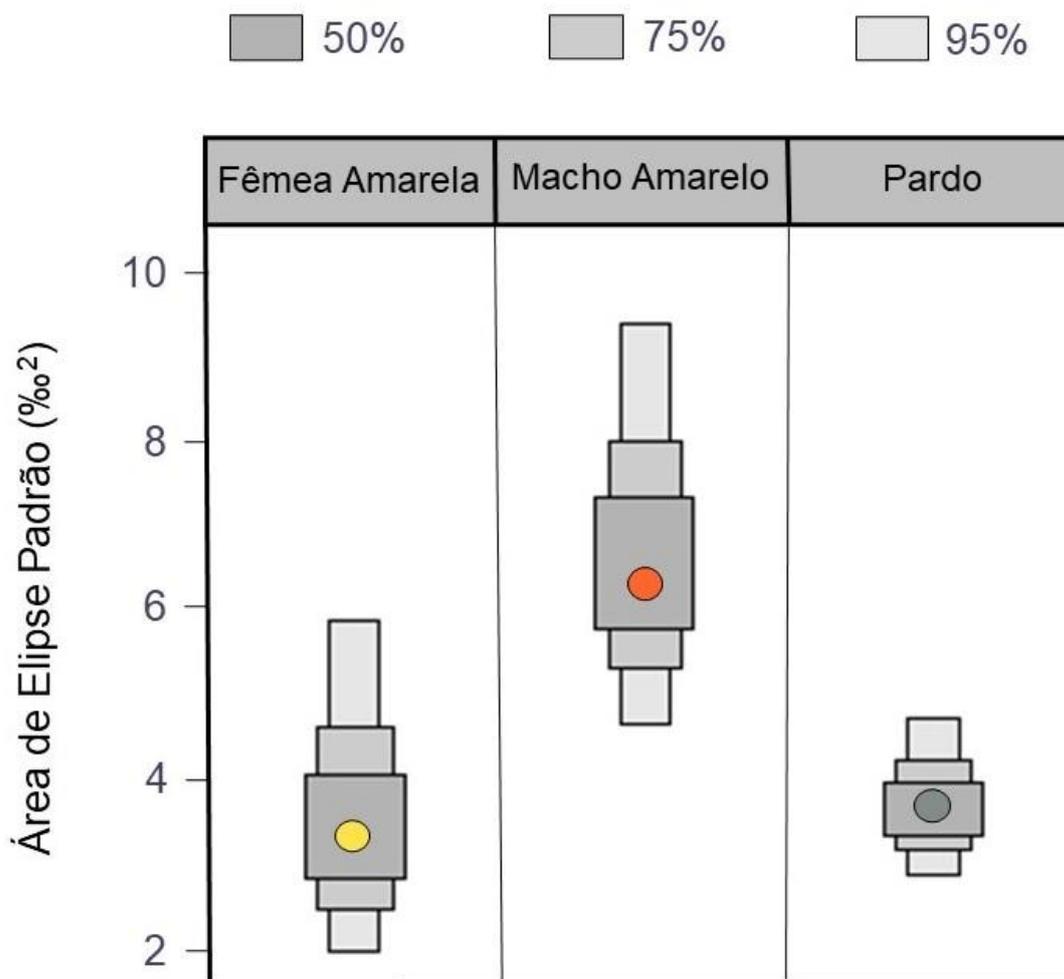


Figura 11: Estimativa da largura do espaço do nicho isotópico das fêmeas amarelas (pontos em amarelo), machos amarelos (pontos em laranja) e indivíduos pardos (pontos em cinza) de canário-da-terra com os valores isotópicos de penas da asa. As caixas indicam intervalos de credibilidade de 95, 75 e 50% e os pontos representam o valor do SEA_B.

O nicho isotópico dos machos amarelos apresentou uma alta porcentagem de sobreposição de 93,3% (95% CI = 76,8% - 99,7%) com o nicho isotópico de fêmeas amarelas e 96,6% (90,4% - 99,7%) com o nicho dos indivíduos pardos (Figura 12). No entanto, houve menor porcentagem de sobreposição do nicho isotópico das fêmeas amarelas e de indivíduos pardos em relação aos machos amarelos. As fêmeas amarelas apresentaram uma porcentagem de sobreposição de 61,9% (42,9% - 81,9%) e indivíduos pardos de 74,7% (59,5% - 88%) em relação ao nicho isotópico dos machos amarelos (Figura 12). A sobreposição do nicho isotópico foi maior em indivíduos pardos em relação as fêmeas amarelas, com porcentagem

de sobreposição de 81,2% (62,2% - 95,6%), enquanto fêmeas amarelas apresentaram uma sobreposição de 73,2% (55,9% - 91,6%) em relação aos pardos (Figura 12).

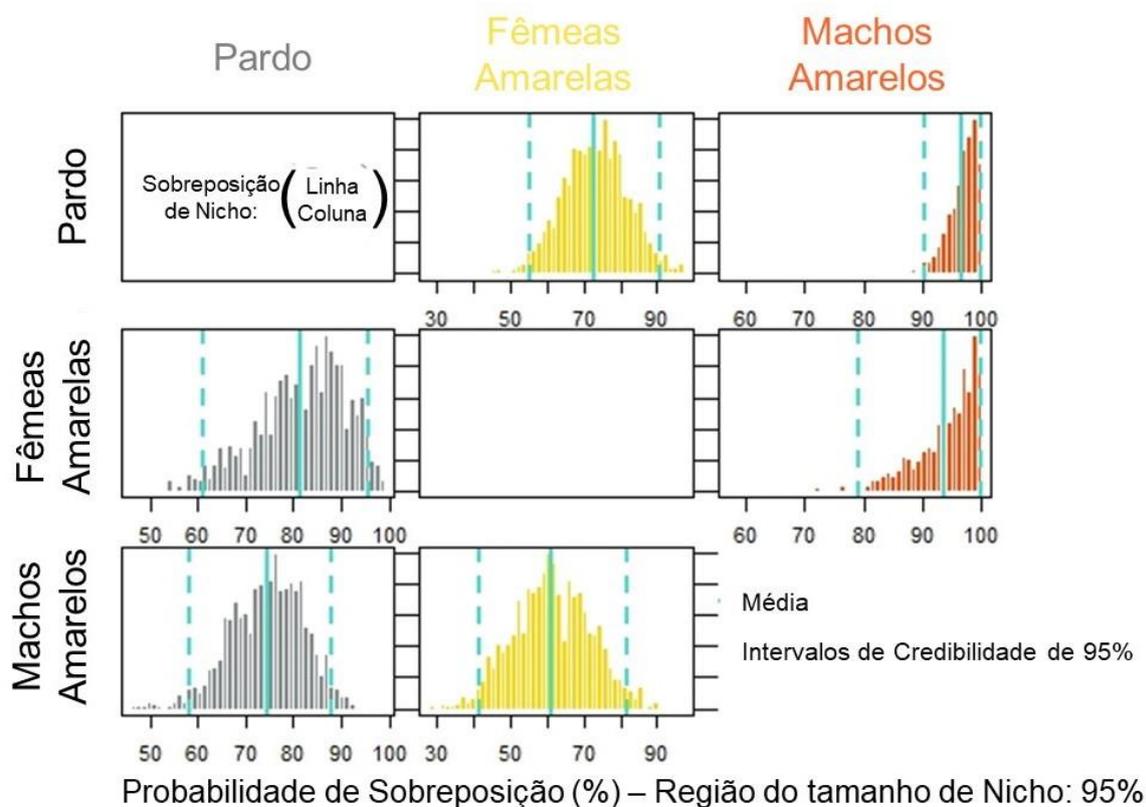


Figura 12. Gráfico Bayesiano da distribuição de probabilidade posterior da métrica da região de nicho (%) para fêmeas amarelas (em amarelo), machos amarelos (em laranja) e indivíduos pardos (em cinza) de canário-da-terra. As médias posteriores são representadas em linhas sólidas e os intervalos de credibilidade de 95% em linhas a tracejado; ambos são apresentados a cor turquesa.

5.4 Relação entre Dieta e Coloração da Plumagem de Machos de Canário-da-terra

As relações entre as variáveis colorimétricas e a razão isotópica de carbono e nitrogênio de penas da frente e do peito de machos amarelos estão apresentadas na Tabela 4 e nas Figuras 13 e 14.

As variáveis colorimétricas de brilho e saturação das penas da frente de machos amarelos não foram correlacionadas com o $\delta^{13}\text{C}$ e nem com o $\delta^{15}\text{N}$ (Tabela 6). A variável matiz das penas da frente dos machos amarelos não foi correlacionada com o $\delta^{13}\text{C}$ (Tabela 6, Figura 13). No entanto, as penas da frente foram inversamente correlacionadas com o $\delta^{15}\text{N}$,

indicando que uma tonalidade mais laranja-avermelhado foi associada com valores mais altos de $\delta^{15}\text{N}$ ($r = -0,51$; $p = 0,007$; Figura 13).

Tabela 6. Relação entre as variáveis colorimétricas (brilho, matiz e saturação) das penas da frente e peito de machos amarelos ($N = 26$) com os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$. A correlação de Spearman possui o fator r como coeficiente de correlação em que -1 indica uma correlação negativa e 1 como uma correlação positiva. O valor p indica a significância da relação.

Tipo de Pena	variável colorimétrica	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Frente	Brilho	$r = -0,08$	$r = 0,01$
		$p = 0,67$	$p = 0,95$
	Matiz	$r = 0,22$ $p = 0,28$	$r = -0,51$ $p = 0,007$
	Saturação	$r = 0,72$ $p = 0,73$	$r = 0,10$ $p = 0,95$
Peito	Brilho	$r = 0,06$	$r = 0,1$
		$p = 0,77$	$p = 0,62$
	Matiz	$r = -0,43$ $p = 0,02$	$r = 0,44$ $p = 0,02$
	Saturação	$r = -0,28$ $p = 0,14$	$r = 0,20$ $p = 0,31$

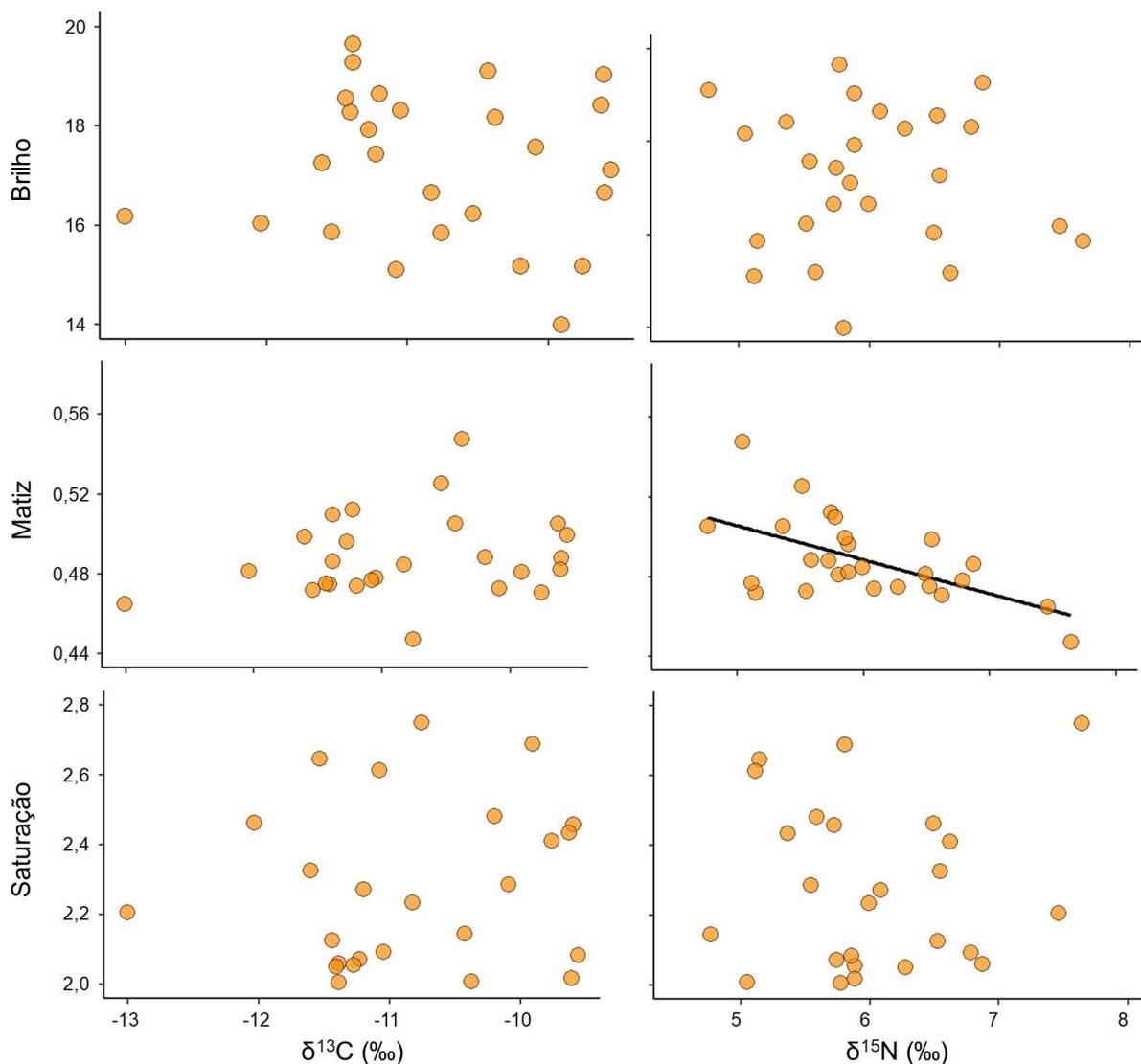


Figura 13. Relação entre as variáveis colorimétricas (brilho, matiz e saturação) e valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das penas da frente de machos amarelos. A linha de tendência sinaliza as variáveis que foram significativamente correlacionadas.

As variáveis colorimétricas de brilho e saturação das penas do peito de machos amarelos também não apresentaram correlação com o $\delta^{13}\text{C}$ e nem com o $\delta^{15}\text{N}$ (Tabela 5). No entanto, a variável colorimétrica matiz correlacionou com os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das penas do peito de machos amarelos (Tabela 5, Figura 14). O $\delta^{13}\text{C}$ foi inversamente correlacionado com a matiz, indicando que maiores valores de $\delta^{13}\text{C}$ estão relacionados a uma tonalidade da plumagem do peito mais amarelada ($r = -0,43$; $p = 0,02$; Figura 14). Já para o $\delta^{15}\text{N}$ das penas do peito, a matiz foi positivamente correlacionada, e menores valores de $\delta^{15}\text{N}$ nas penas do peito indicam uma tonalidade da plumagem mais amarelada ($r = 0,44$; $p = 0,02$; Figura 14).

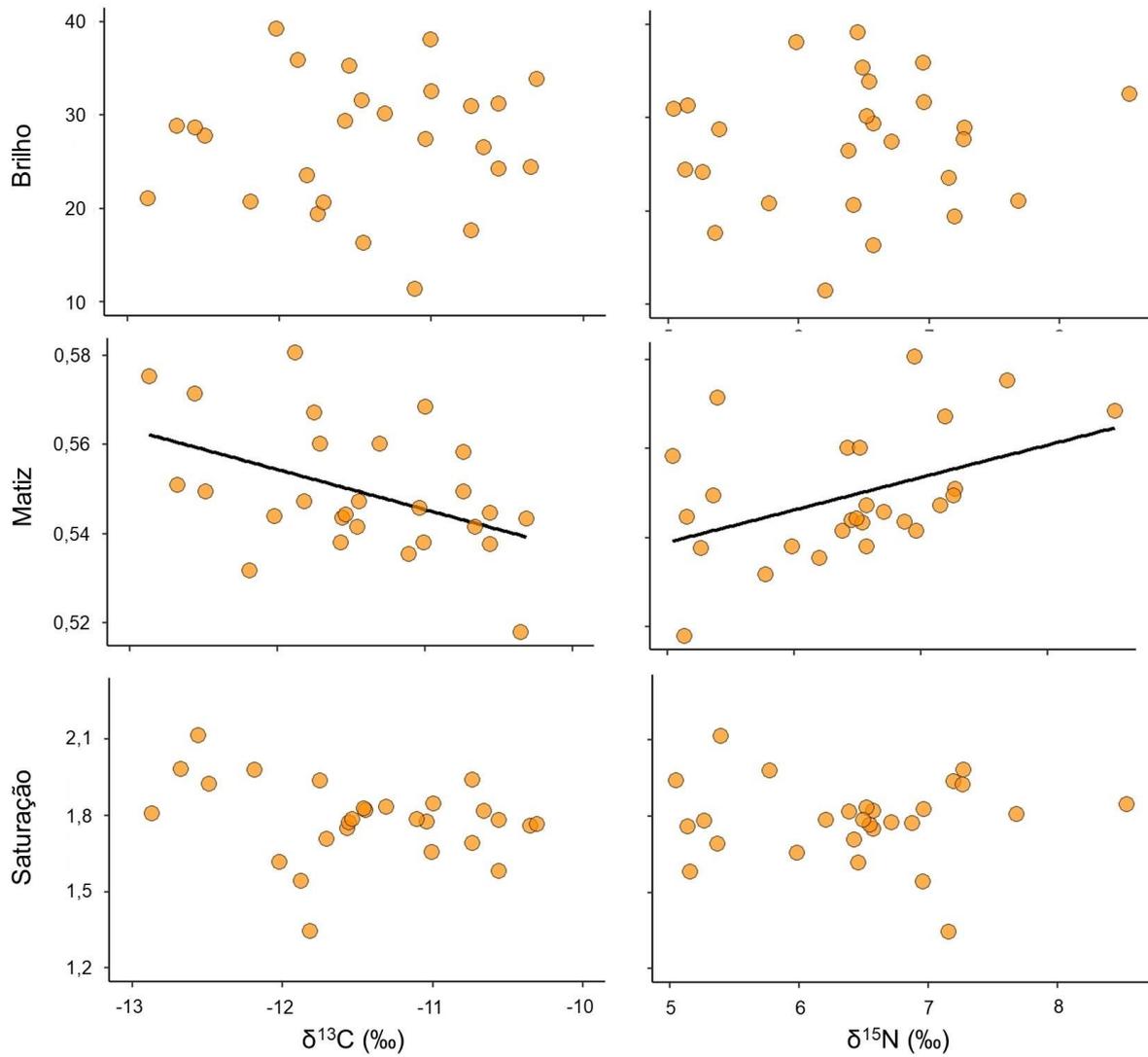


Figura 14. Relação entre as variáveis colorimétricas (brilho, matiz e saturação) e valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das penas do peito de machos amarelos. A linha de tendência sinaliza as variáveis que foram significativamente correlacionadas.

6. DISCUSSÃO

6.1 Variação Temporal da Dieta e Diferenças do Forrageamento entre Classes de idade e sexo de Canário-da-terra

Os valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ do sangue foram semelhantes entre fêmeas amarelas, machos amarelos e indivíduos pardos, mas os resultados mostraram que apenas as fêmeas amarelas não diferiram os valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre os meses de amostragem. A variação do $\delta^{13}\text{C}$ encontrada para os machos amarelos e indivíduos pardos entre os meses foi em cerca de 2,3‰, o que não sugere uma mudança da fonte alimentar basal, mas uma variação dos recursos incorporados na dieta ao longo do ano. Os valores do $\delta^{13}\text{C}$ variam entre -15 a -8‰, indicando que o canário-da-terra acessa predominantemente fonte alimentar basal C_4 , o que corresponde a ambientes com predomínio de gramíneas, como savanas abertas, campos e pastagens exóticas, a qual a espécie costuma normalmente forragear (Sick, 1997, Palmeiro & Massoni 2009; Martinelli et al., 2020).

Os valores médios de $\delta^{15}\text{N}$ do sangue também foram semelhantes entre fêmeas amarelas, machos amarelos e indivíduos pardos com valores próximos a 6‰. Os valores médios de $\delta^{15}\text{N}$ foram maiores em relação a outras espécies granívoras, como o congênere simpátrico canário-rasteiro (*Sicalis citrina*) em cerca de 4‰ (Carvalho, 2022). Considerando que os valores de $\delta^{15}\text{N}$ de potenciais fontes basais correspondentes aos sítios de forrageamento do canário-da-terra no Cerrado apresentam valores negativos (i.e., Cerrado sensu stricto, campos de gramíneas nativa e de capim-gordura *Melinis minutiflora*; veja Sena-Sousa et al., 2023), é provável que fontes alimentares de alto nível trófico, como artrópodes, apresentam-se importantes como fonte proteica na dieta do canário-da-terra (e.g., Dzielski et al., 2021). Besouros, borboletas, gafanhotos e mariposas, bem como suas larvas, podem ser potenciais recursos alimentares para esta ave granívora (Wilson et al., 1999).

Em outubro, os indivíduos pardos apresentaram menores valores de $\delta^{15}\text{N}$ do sangue em comparação aos outros meses em aproximadamente 3‰, indicando uma dieta de menor nível trófico nesta época do ano (Migawada & Wada, 1984; Post, 2002). Esse período corresponde ao fim da estação seca, e, portanto, a disponibilidade de recursos alimentares ainda deve ser limitada com uma elevada competição. Como tal, os machos amarelos, mas não as fêmeas amarelas, variaram os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ com os pardos apenas neste período, e essas observações sugerem uma segregação hierárquica durante o forrageamento entre as categorias, refletindo a inexperiência do forrageamento e a menor capacidade competitiva dos pardos. Isso provavelmente deve-se ao fato de que a ornamentação à base de carotenoides dos machos

amarelos represente um sinal social fidedigno relacionado a dominância de grupo quanto à eficiência no forrageamento (Pryke et al., 2002; Santos et al., 2011; Dey et al., 2014), indicando uma maior capacidade competitiva e condicionando o acesso preferencial por recursos alternativos de alta qualidade, como artrópodes, recurso limitante nesta época do ano.

Complementarmente, os resultados mostram que os valores de $\delta^{15}\text{N}$ foram semelhantes entre os meses de amostragem para fêmeas e machos amarelos, indicando uma dieta consistente de recursos com alto nível trófico ao longo do ano. Alguns estudos relataram que artrópodes acumulam quantidades consideráveis de carotenoides, e, portanto, são considerados um recurso alimentar importante para aves com coloração à base de carotenoides, tanto para a ornamentação como para nutrição (Olson, 2006; Dzielski et al., 2021). Assim, é provável que essas categorias mantiveram o acesso a grandes quantidades de carotenoides. Nesse aspecto, é importante destacar que em outubro, o processo de muda das penas do corpo ainda não ocorre para indivíduos amarelos, apenas para os indivíduos pardos (Costa et al., 2022), o que pode indicar que os carotenoides incorporados por machos amarelos não foram alocados para ornamentação. Alternativamente, como outubro corresponde ao período pré-reprodutivo do canário-da-terra, é presumível que devido as propriedades antioxidantes dos carotenoides, houve uma alocação para manutenção de processos fisiológicos a fim de não comprometer o sistema imunológico (Simons et al., 2012) e subsequentemente afetar o investimento reprodutivo (Colominas-Ciuró et al., 2017).

As diferentes penas apresentaram valores isotópicos maiores em comparação ao sangue, como relatado em estudos anteriores (e.g., Hobson & Clarck 1992; Cherel et al., 2005; Quillfeldt et al., 2008; Oortwijn, et al., 2023). No entanto, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ das penas da asa de fêmeas amarelas e, das penas das frentes de todas as categorias foram semelhantes ao sangue. Além disso, a diferença média dos valores isotópicos entre as diferentes penas e sangue foram inferiores a 2‰ para $\delta^{13}\text{C}$ e 1‰ para $\delta^{15}\text{N}$ em todas as categorias. Esses resultados sugerem que o canário-da-terra acessa uma dieta semelhante em termos isotópicos, o que parece refletir a uma baixa discriminação isotópica entre tecidos com diferentes períodos de renovação. Martínez del Rio et al. (2009) fazem um paralelo com o pedreiro-do-litoral (*Cinclodes nigrofumosus*) aos resultados encontrados para o canário-da-terra, uma vez que compararam a dieta com base em diferentes tecidos de diferentes períodos de renovação referente a dieta do inverno (fígado – 15 dias e músculo – 30 dias) e verão (penas). Os autores mostram que a variação entre os tecidos foi de 1,2‰ para $\delta^{13}\text{C}$ e 1‰ para $\delta^{15}\text{N}$, e sugeriram que o pedreiro-do-litoral é uma espécie especialistas em termos isotópicos (Martínez del Rio et al., 2009). Esse estudo apoia a ideia de que o canário-da-terra, assim como o pedreiro-do-litoral, apresenta uma

variação singular da dieta, e, portanto, acessam fontes alimentares consistentes em termos isotópicos, no caso do canário-da-terra, uma dieta baseada em sementes e outros grãos, mas também podendo acessar frequentemente artrópodes (Rising & Jaramillo, 2024).

As diferentes penas apresentaram valores semelhantes entre as categorias e cada pena entre as categorias. Todas as variações observadas inferiores a 1‰. Embora esse resultado indique que as categorias acessem fontes alimentares semelhantes em termos isotópicos, é razoável presumir que os indivíduos amarelos podem forragear de maneira seletiva recursos alimentares alternativos de alta qualidade em termos de alto teor de carotenoides (Bascuã et al., 2009). Isso porque as concentrações de carotenoides podem variar entre diferentes fontes alimentares, incluindo entre pequenos artrópodes (Olson, 2006) e sementes comuns na dieta de aves granívoras com ornamentação à base de carotenoides (McGraw et al., 2001).

O espaço isotópico dos machos amarelos foi maior em comparação a fêmeas amarelas e indivíduos pardos, que indica uma maior diversidade alimentar devido a maior variação interindividual da dieta. O espaço isotópico de fêmeas e machos amarelos apresentaram uma maior amplitude de $\delta^{15}\text{N}$, revelando uma dieta de alto nível trófico em relação aos pardos. No entanto, as fêmeas amarelas tinham o menor espaço isotópico entre as categorias. Isso sugere que os machos são mais dominantes na exploração de recursos alimentares, em particular, ricos em carotenoides para manter uma ornamentação mais vibrante, enquanto para as fêmeas, os carotenoides pode ser um recurso limitante devido ao elevado custo energético da reprodução (Parker & Holm, 1990; Andersson, 1994; Chantal et al., 2016). Estudando diferenças quanto a dieta entre os sexos de hihi (*Notiomystis cincta*), Walker et al. (2014) evidenciaram que machos incorporam de maneira seletiva frutas com elevado teor em carotenoides na dieta, possivelmente devido ao alto teor de carotenoides para alocar a ornamentação. Já as fêmeas, incorporam uma maior proporção de recursos com alta proporção de gordura e proteína para compensar as exigências nutricionais da reprodução (Walker et al., 2014). É presumível que as fêmeas de canário-da-terra que expressam a ornamentação amarela possam estar em melhores condições, e, portanto, aumentam a eficiência no forrageamento. Além de que podem estar acessando fontes alimentares alternativas ricas em carotenoides, como pequenos artrópodes (alocando esses recursos para a ornamentação). Estudos anteriores relataram que fêmeas com ornamentação à base de carotenoides se envolvem frequentemente em disputas físicas contra co-específicos para acessar recursos mais rentáveis, (Leitão et al., 2019; Araujo-Silva et al., 2023), no entanto, apenas em períodos em que a disponibilidade de recursos alimentar é limitada e com alta competição.

As diferenças na largura dos espaços isotópicos entre as categorias sugerem que apesar de apresentarem uma alta sobreposição, cada categoria apresenta especificidades em relação ao uso dos recursos disponíveis. A maior largura encontrada para os machos pode refletir uma maior capacidade de exploração, e por sua vez demonstrar maior dominância social entre os grupos. A partição de recursos alimentares impulsionada pela competição tem um papel importante na condução da coloração da plumagem à base de carotenoides entre classes de idade e sexos em espécies que atrasam a maturação da plumagem (Hawkins et al., 2012; Dale et al., 2015; Pagani-Núñez et al., 2019).

6.2 Coloração da plumagem de Machos de Canário-da-terra e a sua Relação com a dieta

Os resultados mostram que a variável colorimétrica matiz foi positivamente correlacionada com os valores de $\delta^{15}\text{N}$ das penas do peito, indicando que uma plumagem ornamental mais amarelo/alaranjado está associada a uma dieta mais diversificada. Além disso, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram inversamente correlacionados com valores mais positivos (i.e., uma plumagem mais amarela/alaranjado do peito), indicando que a fonte de aquisição dos carotenoides provém de fontes alimentares basais C_4 mais específicos. Isso sugere que o acesso a uma maior variedade de sementes e grãos, além de pequenos artrópodes pode condicionar a incorporação de uma maior concentração de carotenoides (McGraw et al., 2001; Olson, 2006; Osinubi et al., 2018). Estudos anteriores também mostraram que, embora a concentração de carotenoides possa variar entre as fontes alimentares (Olson, 2006), forrageadores mais eficientes podem ser capazes de discriminar as fontes alimentares com elevado teor de carotenoides (Bascunán et al., 2009; Senar et al., 2010; Catoni et al., 2011) e, portanto, propiciar uma ornamentação mais vibrantes.

O presente estudo não identificou o conteúdo dos carotenoides presente nas penas do canário-da-terra, no entanto, é presumível que os carotenoides amarelos (i.e., alfa e betacaroteno, luteína, zeantaxitina) incorporados na dieta tenham sido alocados diretamente para as penas ornamentais do peito. Isso porque os carotenoides dietéticos amarelos são comumente presentes em sementes e grãos e encontrados em alta concentração em pequenos artrópodes (McGraw et al., 2001, McGraw, 2006; Maoka et al., 2021). Além disso, espécies granívoras foram frequentemente relatadas com carotenoides amarelos da dieta em suas penas ornamentais (Stradi, 1999; McGraw et al., 2003; 2004), incluindo o congênere simpátrico canário-rasteiro (*Sicalis citrina*) (Carvalho, 2022).

Sparrow et al. (2017) fazem um paralelo com o que foi relatado para o *Icterus bullockii*, onde o baixo $\delta^{15}\text{N}$ indicou uma dieta com maior proporção de frutos para indivíduos com tonalidade alaranjada. Os autores identificaram os carotenoides nas penas, e verificaram carotenoides amarelos da dieta, como luteína e zeantaxitina, e apenas um convertido, cantaxitina, que é comum em artrópodes com baixa concentração. Além disso, a concentração total de carotenoides e, de zeantaxitina das penas estavam positivamente correlacionadas com o $\delta^{15}\text{N}$, indicando que os carotenoides não estavam limitados no habitat e poderiam advir de outras fontes alimentares (Sparrow et al., 2017). Neste caso, é importante ressaltar que a dieta do canário-da-terra e *I. bullockii* diferem consideravelmente; *I. bullockii* têm uma dieta mais variada de frutas e artrópodes (Flood et al., 2016), enquanto o canário-da-terra é predominantemente granívoro, mas que também pode incorporar artrópodes (Rising & Jaramillo, 2024). No entanto, a literatura ressalta que a concentração de carotenoides de grãos e sementes são baixos em comparação a frutos e, portanto, poderia limitar a expressão da plumagem do canário-da-terra (McGraw et al., 2001; Mahler et al., 2003; Olson, 2006), assim, é provável que os carotenoides sejam incorporados principalmente de fontes tróficas secundárias e/ou terciárias (e.g., artrópodes ricos em carotenoides; Maoka et al., 2021).

As penas da frente de machos amarelos apresentam como característica uma coloração vermelho-alaranjado, possivelmente resultado da deposição de ceto-carotenoides, responsáveis por tons de laranja e vermelho (Weaver et al., 2018; Hill et al., 2023). Os resultados mostram a variável matiz foi inversamente correlacionada com o $\delta^{15}\text{N}$, o que indica que machos com uma tonalidade da frente mais laranja-avermelhado são associados a altos valores de $\delta^{15}\text{N}$. Como a variável matiz é correlacionada com a concentração de carotenoides, esse resultado sugere que os carotenoides foram adquiridos de fontes alimentares de alto nível trófico. Alguns pequenos artrópodes são capazes de converter metabolicamente os carotenoides amarelos da dieta em ceto-carotenoides, como a astaxintina e cantaxitina (Goodwin, 1984; Czezuga et al., 2008). Assim, os custos associados ao processo de conversão metabólica podem ser compensados ao incorporar de maneira consistente pequenos artrópodes com alto teor de ceto-carotenoides, ao passo que a alocação direta desses carotenoides na ornamentação da frente condiciona uma expressão mais vibrante. Isso foi observado em um estudo experimental, onde McGraw et al. (2001) suplementaram a dieta de indivíduos de Pitassilgo-americano (*Spinus tristis*), uma ave com ornamentação tipicamente amarela, com ceto-carotenoides: astaxintina e cantaxitina. Os autores evidenciaram que os indivíduos foram capazes de depositar esses novos pigmentos na plumagem e, passaram a desenvolver uma ornamentação alaranjada (McGraw et al., 2001).

Alternativamente, é provável que a ornamentação da frente mais laranja-avermelhada com o alto $\delta^{15}\text{N}$ não indique a aquisição de elevadas concentrações de ceto-carotenoides por recursos de alto nível trófico, mas a condição fisiológica do indivíduo devido a suplementação consistente de proteínas e assim, refletindo a eficiência na conversão metabólica. Estudos anteriores relataram que indivíduos com melhores condições fisiológicas foram relacionados com alto $\delta^{15}\text{N}$, indicando que suplementação proteica pode compensar gastos energéticos (Ramirez-Otarola et al., 2024). Isso apoia a ideia de que machos de canário-da-terra podem estar em melhores condições nutricionais e de saúde ao incorporar uma quantidade considerável de proteína (e.g., Dzielski et al., 2021; Simons et al., 2023). Isso pode ter propiciado uma boa condição fisiológica para converter metabolicamente os carotenoides da dieta e ceto-carotenoides e alocá-los para frente, resultando em uma expressão mais vibrante da plumagem.

É importante destacar que os machos de canário-da-terra aparentemente são capazes de modular a via de deposição dos carotenoides. Isso pode ser apoiado a partir do estudo de Stradi et al. (1995), que relatou que as asas amarelas e manchas vermelhas no rosto de *Carduelis carduelis* constituem a mesma composição de carotenoides, e a espécie se mostra capaz de alterar a via de alocação dos carotenoides antes da deposição dentre as penas. Assim, é provável que os machos de canário-da-terra sejam capazes de controlar o desenvolvimento da ligação física de diferentes carotenoides em diferentes penas, ao modular as forças de ligação através do uso de carotenoides específicos (e.g., Stradi et al. 1995; LaFountain et al. 2015). Essa relação ainda não está tão clara, já que não foram mensurados as concentrações e proporções dos carotenoides, bem como a identificação dos tipos de carotenoides depositados na ornamentação. Assim, interpretação de como os machos utilizam os carotenoides internamente entre as vias de ligação com a ornamentação reforça a ideia de que a natureza das rotas bioquímicas, pelos quais os carotenoides são absorvidos, transportados, metabolizados e, como expressam na plumagem (Hill et al., 1994) exigirá uma investigação mais aprofundada para correlacionar com os sistemas de sinalização sexual e social.

A explicação mais provável para a modularidade no uso de carotenoides entre penas do peito e frente para expressar diferentes fenótipos de cores é porque pode estar sob pressão da seleção sexual e social (LaFountain et al., 2015). Com a expressão da plumagem amarela desempenhando um papel fundamental na comunicação social, em ambos os sexos (Araújo-Silva et al. 2023; Delhey et al., 2023), a frente laranja-avermelhada de machos pode representar um sinal fidedigno de qualidade individual importante na comunicação sexual (Cruz-Bernate et al., 2023). Isso porque vários estudos não relacionam a expressão da plumagem amarela de machos da subespécie *S. flaveola pelzelni* como um critério importante na avaliação de fêmeas

quanto a escolha de parceiros, aumento do sucesso reprodutivo ou relacionado ao cuidado parental (e.g., Palmerio & Massoni, 2009; 2011; Benitez-Saldivar & Massoni, 2018; Benitez-Saldivar et al., 2022). Portanto, novos estudos sobre biologia reprodutiva de canário-da-terra devem considerar a coloração da fronte de machos como um possível sinal importante na comunicação sexual.

7. CONCLUSÃO

A alta variação temporal quanto à disponibilidade de recursos alimentares na região do Cerrado do Brasil Central revelou que as categorias de canário-da-terra exploram de forma consistente fontes alimentares basais C₄ longo do ano, o que está associado a vegetação predominante a qual espécie normalmente costuma forragear, e não uma mistura de fontes C₃ e C₄ como prevíamos. No entanto, durante a baixa oferta de recursos, os indivíduos pardos foram condicionados a acessar fontes alimentares de baixo nível trófico como reflexo da inexperiência do forrageamento e baixa capacidade competitiva em relação aos machos amarelos que, por sua vez, foram mais dominantes quanto à eficiência no forrageamento.

As análises isotópicas de diferentes tecidos com diferentes períodos de renovação revelaram uma baixa discriminação tecidual dos valores isotópicos entre sangue e diferentes penas (asa, cauda, frente e peito) entre as categorias, além de que uma semelhança dos valores isotópicos das diferentes penas entre e dentro as categorias. Isso indica que o canário-da-terra mantém uma dieta consistente de fontes alimentares semelhantes em termos isotópicos, e não apresenta uma singularidade temporal da dieta entre as categorias.

No entanto, o espaço isotópico revelou que, embora as fêmeas e machos amarelos tenham uma dieta mais diversificada de recursos de alto nível trófico em relação aos pardos, os machos amarelos tinham uma maior diversidade alimentar. Esses resultados sugerem que, embora haja um compartilhamento de recursos alimentares entre as categorias, cada categoria pode apresentar um nível de especificidade da dieta em resposta à eficiência do forrageamento. Portanto, a partição de recursos e as restrições do uso do nicho impulsionadas pela competição aparentemente desempenham um papel na condução de diferenças de cor em ornamentos à base de carotenoides entre classes de idade em espécies que atrasam a maturação da plumagem.

A dieta foi relacionada com apenas a matiz das penas ornamentais da frente e peito dos machos amarelos, corroborando parcialmente as previsões da dissertação. Os resultados revelaram distintas vias de aquisição dos carotenoides que resultam em diferentes fenótipos de cor; uma dieta mais diversa com sementes e artrópodes está relacionada a uma ornamentação mais amarelada do peito, e uma frente mais laranja-avermelhado está relacionada a uma dieta baseada em artrópodes. Isso sugere uma maior seletividade de recursos com alto teor e variedade de carotenoides, e que os machos amarelos podem modular o uso desses carotenoides em relação a sua deposição nos ornamentos em função à pressão da seleção sexual e social.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos valores $\delta^{15}\text{N}$ observados no mês de outubro entre as categorias, como consequência da menor disponibilidade de recursos alimentares, foi sugerido uma segregação hierárquica no forrageamento relacionado à habilidade de forrageamento entre as categorias. Em particular, os machos amarelos mantiveram altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ em outubro, enquanto indivíduos pardos foram condicionados a acessar fontes alimentares de baixo nível trófico - baixo $\delta^{15}\text{N}$. Embora não tenhamos observado uma variação do $\delta^{15}\text{N}$ das fêmeas amarelas em relação às outras categorias, possivelmente devido ao N amostral nesse mês ($N = 1$; Tabela 2), espera-se que também apresentem uma maior eficiência no forrageamento em relação aos indivíduos pardos. Já que os valores de $\delta^{15}\text{N}$ das fêmeas amarelas não variam ao longo do ano.

O presente estudo fornece informações de uma dieta consistente em termos isotópicos refletido em diferentes tipos penas para o canário-da-terra, uma espécie que frequentemente apreendida no comercio ilegal de animais silvestres (Destro et al., 2012; Costa et al., 2018). Esse achado se torna importante para estudos de âmbito forense da vida selvagem com a abordagem da ferramenta isotópica, permitindo a seleção de quaisquer tipos de pena para análises isotópicas a fim de diferenciar indivíduos de cativeiro e vida livre e inferir a proveniência de indivíduos apreendidos no comercio ilegal de animais selvagens.

A largura do espaço isotópico foi maior para machos amarelos, e, assim, refletindo uma maior capacidade de exploração de recursos e uma maior dominância social entre os grupos. Esses resultados fornecem uma base solida para a relação da coloração ornamental da frente e peito dos machos amarelos que, por sua vez, mostraram vias de aquisição dos carotenoides contrastantes quanto a fonte alimentar.

No presente estudo, não foram mensurados a concentração e proporção, bem como a identificação do tipo de carotenoides depositados na ornamentação das penas da frente e peito devido às limitações metodológicas. Isso é importante para considerar em futuros estudos porque pode fornecer informações complementares quanto a concentração e proporção das fontes de aquisição dos carotenoides, além de verificar a sua relação com a expressão da plumagem, partindo do pressuposto que uma maior concentração e proporção de carotenoides configura uma expressão mais vibrante dos ornamentos. Adicionalmente, como foi sugerido que os machos de canário-da-terra potencialmente podem modular o uso dos carotenoides para expressar diferentes tonalidades, identificar os carotenoides depositados na ornamentação pode indicar a via metabólica percorrida antes da sua deposição na plumagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA, 2024 [Acessado em 18 janeiro de 2024]. *Hidro Web: Sistema de Informações hidrológicas* [online]. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>.
- ALONSO-ALVAREZ, C., PÉREZ-RODRÍGUEZ, L., MATEO, R., CHASTEL, O. & VIÑUELA, J. 2014. The oxidation handicap hypothesis and the carotenoid allocation trade-off. *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 21, no. 6, pp. 1789–1797.
- ANDERSSON, M., 1994. *Sexual selection*. New Jersey: Princeton University Press.
- ARAÚJO-SILVA, B., BARCELLOS, M., DUCA, C. & DINIZ, P. 2023. Delayed plumage signals social status in a mutually ornamented bird. *Journal of Ornithology*, vol. 164, no. 2, pp. 417–431.
- BARNUM, T.R., VERBURG, P., KILHAM, S.S., WHILES, M.R., LIPS, K.R., COLÓN-GAUD, C., & PRINGLE, C. M., 2013. Use of stable isotope ratios to characterize potential shifts in the isotopic niches of grazing insects following an amphibian decline in a Neotropical stream. *Journal of Tropical Ecology*, vol. 29, no. 4, pp. 291-299.
- BASCUÑÁN, A.L., TOURVILLE, E.A., TOOMEY, M.B. & MCGRAW, K.J., 2009. Food color preferences of molting house finches (*Carpodacus mexicanus*) in relation to sex & plumage coloration. *Ethology*, vol. 115, pp. 1066–1073.
- BATALHA, M.A. & MARTINS, F.R., 2004. Reproductive phenology of the cerrado plant community in Emas National Park (central Brazil). *Australian Journal of Botany*, vol. 52, no. 2, pp. 149–161.
- BEARHOP, S., FURNESS, R.W., HILTON, G.M., VOTIER, S.C. & WALDRON, S., 2003. A forensic approach to understanding diet and habitat use from stable isotope analysis of (avian) claw material. *Functional Ecology*, vol. 17, no 2, pp.270–275.
- BENÍTEZ-SALDÍVAR, M.J. & MASSONI, V., 2018. Lack of conspecific visual discrimination between second-year males & females in the Saffron Finch. *PLoS ONE*, vol. 13, no. 12, pp. e0209549.

- BENÍTEZ-SALDIVAR, M. J., MIÑO, C. I. & MASSONI, V., 2022. Extra-pair paternity in the Saffron Finch is related to song peak frequency & body condition. *Emu-Austral Ornithology*, vol. 122, no. 3-4, pp. 226-237.
- BLIGHT, L. K., HOBSON, K. A., KYSER, T. K. & ARCESE, P. 2015. Changing gull diet in a changing world: A 150-year stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) record from feathers collected in the Pacific Northwest of North America. *Global Change Biology*, vol. 21, pp. 1497–1507.
- BLOUNT, J.D., 2004. Carotenoids & life-history evolution in animals. *Arch Biochem Biophys*, vol. 430, no. 1, pp. 10–15.
- BLOUNT J.D. & MCGRAW K.J., 2008. Signal functions of carotenoid colouration. In: G., BRITTON, S., LIAAEN-JENSEN, & H., PFANDER. *Carotenoids: Natural Functions*. Basel: Birkhäuser Basel.
- BOECKLEN, W.J., YARNES, C.T., COOK, B.A. & JAMES, A.C., 2011. On the use of stable isotopes in trophic ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution & Systematics*, vol. 42, pp. 411–440.
- BOND, A.L., JARDINE, T.D. & HOBSON, K.A., 2016. Multi-tissue stable-isotope analyses can identify dietary specialization. *Methods in Ecology & Evolution*, vol. 7, no. 12, pp. 1428–1437.
- BOSENBECKER, C. & BUGONI, L., 2020). Trophic niche similarities of sympatric Turdus thrushes determined by fecal contents, stable isotopes, & bipartite network approaches. *Ecology & Evolution*, vol. 10, no. 17, pp. 9073–9084.
- BRENES-SOTO, A., & DIERENFELD, E. S., 2014. Effect of dietary carotenoids on vitamin A status & skin pigmentation in false tomato frogs (*Dyscophus guineti*). *Zoo Biology*, vol. 33, no. 6, pp. 544-552.
- CARLETON, S.A. & MARÍNEZ DEL RIO, C., 2005. The effect of cold-induced increased metabolic rate on the rate of ^{13}C & ^{15}N incorporation in house sparrows (*Passer domesticus*). *Oecologia*, vol. 14, pp. 226–232.

- CATONI, C., METZGER, B., SHAEFER, M.H. & BAIRLEN, F., 2011. Garden Warbler, *Sylvia borin*, detect carotenoids in food but differ strongly in individual food choice. *Journal of Ornithology*, vol. 152, pp. 153–159.
- CAMARGO, N.F., REIS, G.G., CAMARGO, A.C.L., NARDOTO, G.B., KNEITEL, J. M. & VIEIRA, E.M., 2021. Seasonal isotopic niche of a rodent: High between-individual variation but no changes in individual niche width during the rich-resource period. *Biotropica*, vol. 53, no. 3, pp. 966-975.
- CARVALHO, D.R., CASTRO, D.M.P., CALLISTO, M., MOREIRA, M.Z. & POMPEU, P.S. 2017. The trophic structure of fish communities from streams in the Brazilian Cerrado under different land uses: an approach using stable isotopes. *Hydrobiologia*, vol. 795, pp. 199-217.
- CARVALHO M., 2022. *Estratégias de acasalamento, sinalização da qualidade individual e deslocamento sazonal de Sicalis citrina pelzeln, 1870*. Brasília: Universidade de Brasília, 122 p. Tese de Doutorado em Ecologia.
- CHANTAL, V., GIBELLI, J. & DUBOIS, F., 2016. Male foraging efficiency, but not male problem-solving performance, influences female mating preferences in zebra finches. *PeerJ*, vol. 4, pp. e2409.
- CHEREL, Y., HOBSON, K.A., BAILLEUL, F.R. & GROSCOLAS, R. 2005. Nutrition, physiology, & stable isotopes: new information from fasting & molting penguins. *Ecology*, vol. 86, no. 11, pp. 2881–2888.
- CORDEIRO, G.G., VASCONCELOS, V., SALEMIM, L.F. & NARDOTO, G.B., 2020. Factors affecting the effectiveness of riparian buffers in retaining sediment: an isotopic approach. *Environmental Monitoring & Assessment*, vol.192, no. 11, pp. 735.
- COSTA, F.J.V., RIBEIRO, R.E., DE SOUZA, C.A. & NAVARRO, R.D. 2018. Espécies de aves traficadas no Brasil: uma meta-análise com ênfase nas espécies ameaçadas. *Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, vol. 7, no. 2, pp. 324-346.

- COSTA, F.J.V., HOBSON, K.A., WUNDER, M.B. & NARDOTO G.B., 2022. Linking environmental indicators to blood, feather, and claw $\delta^{18}\text{O}$ in the Saffron Finch (*Sicalis flaveola*) in the central Brazilian savannas. *Journal of Ornithology*, vol. 163 pp.223–234.
- COLOMINAS-CIURÓ, R., BERTELLOTTI, M., CARABAJAL, E., D'AMICO, V.L. & BARBOSA, A., 2017. Incubation increases oxidative imbalance compared to chick rearing in a seabird, the Magellanic penguin (*Spheniscus magellanicus*). *Marine biology*, vol. 164, no. 5, pp. 99.
- COTTON, S., SMALL, J. & POMIANKOWSKI, A., 2006. Sexual selection and condition-dependent mate preferences. *Current Biology*, vol.16, no. 17, pp. 755–765.
- CRUZ-BERNATE, L., ESPINOSA-BRAVO, C. & RIVERA-GUTIÉRREZ, H.F., 2023. Does cryptic dichromatism exist in the Saffron Finch (*Sicalis flaveola*)? Colorimetric variables and the avian visual model. *Avian Research*, vol. 14, pp. 100127.
- CZECZUGA, B., CZECZUGA-SEMENIUK, E. & SEMENIUK, A., 2008. Canthaxanthin-a predominant carotenoid in galls produced by *Rhodites rosae* (Hymenoptera: Cynipidae). *Current Topics in Plant Biology*, Vol. 9, pp. 129-133.
- D'ALBA, L., VAN HEMERT, C., SPENCER, K.A., HEIDINGER, B.J., GILL, L., EVANS, N. P., MONAGHAN, P., HANDEL, C.L. & SHAWKEY, M.D., 2014. Melanin-based color of plumage: role of condition and of feathers' microstructure. vol, 54, no. 4, pp. 633-644.
- DARWIN, C.R., 1871. *The descent of man, and selection in relation to sex*. New York: Appleton
- DALE, J., DEY, C.J., DELHEY, K., KEMPENAERS, B. & VALCU, M., 2015. The effects of life history and sexual selection on male and female plumage colouration. *Nature*, vol. 527, no. 7578, pp. 367-370.
- DESTRO, G.F.G., PIMENTEL, T.L., SABAINI, R. M., BORGES, R.C. & BARRETO, R. 2012. Efforts to combat wild animals trafficking in Brazil. *Biodiversity enrichment in a diverse world*, vol. 1, no. 1, pp. 421-436.

- DELHEY, K., SMITH, J., & PETERS, A. 2013. Colour-variable birds have broader ranges, wider niches and are less likely to be threatened. *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 26, no. 7, pp. 1559-1568.
- DELHEY, K., VALCU, M., DALE, J., & KEMPENAERS, B. 2023. The evolution of carotenoid-based plumage colours in passerine birds. *Journal of Animal Ecology*, vol. 92, no. 1, pp. 66-77.
- DENIRO, M.J. & EPSTEIN, S., 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et cosmochimica acta*, vol. 42, no. 5, pp. 495-506.
- DEY, C.J., DALE, J. & QUINN, J.S., 2014. Manipulating the appearance of a badge of status causes changes in true badge expression. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 281, no. 1775, pp. 20132680.
- DIAS, R.I., MANICA, L.T., GRESSLER, D., BELL, J.A., & FECCHIO, A. 2016. Plumage coloration, body condition and immunological status in Yellow-billed Cardinals (*Paroaria capitata*). *Ethology Ecology & Evolution*, vol. 28, no. 4, pp. 462-476.
- DOUCET, S.M., SHAWKEY, M.D., HILL, G.E. & MONTGOMERIE, R., 2006. Iridescent plumage in satin bowerbirds: structure, mechanisms and nanostructural predictors of individual variation in colour. *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, no. 2, pp. 380-390.
- DUNN, P. O., ARMENTA, J. K. & WHITTINGHAM, L. A., 2015. Natural and sexual selection act on different axes of variation in avian plumage color. *Science*, vol. 1, no. 2, pp. e1400155.
- DZIELSKI, S.A., BAILEY, R.L., FERN&EZ-DUQUE, F. & BONTER, D.N., 2021. Supplemental feeding of insect larvae increases mass of nestling Eastern Bluebirds, but not nestling Black-capped Chickadees. *Journal of Field Ornithology*, vol. 92, no. 3, pp. 294-303.
- ESPINOSA, C., CRUZ-BERNATE, L. & BARRETO, G. 2017. Biología reproductiva de *Sicalis flaveola* (Aves: Thraupidae) en Cali, Colombia.

- El Boletín Científico del Centro de Museos de la Universidad de Caldas, vol. 21, pp. 1001-114.
- ENDLER, J.A., 1980. Natural selection on color patterns in *Poecilia reticulata*. *Evolution*, vol.34, no.1, pp. 76-91. <https://doi.org/10.2307/2408316>.
- FEDOSOV, A.E., TIUNOV, A.V., KIYASHKO, S.I. & KANTOR, Y.I., 2014. Trophic diversification in the evolution of predatory marine gastropods of the family Terebridae as inferred from stable isotope data. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 497, no. 3, pp. 143-156.
- FARGEVIEILLE, A., GRÉGOIRE, A., GOMEZ, D. & DOUTRELANT, C., 2023. Evolution of female colours in birds: The role of female cost of reproduction & paternal care. *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 36, no. 3, pp. 579-588.
- FITZE, P.S., TSCHIRREN, B., GASPARINI, J., & RICHNER, H., 2007. Carotenoid-based plumage colors & immune function: Is there a trade-off for rare carotenoids? *The American Naturalist*, vol. 169, pp. 137–144.
- FLOOD, N. J., SCHLUETER, C. L., REUDINK, M. W., PYLE, P. PATTEN, M. A., RISING, J. D. & WILLIAMS, P. L. 2016. Bullock's oriole *Icterus bullockii*, ver. 3.0. – In: Rodewald, P. G. (ed.), *The birds of North America*. Cornell Lab of Ornithology.
- FRINCKE-CRAIG, M., BROWN, J. L., BRIGGS, C. W., POULSON, S. R., COLLOPY, M. W. & FELDMAN, C. R. 2015. Relationships between plumage coloration, diet diversity, and winter body condition in the Lesser Goldfinch. *Journal of ornithology*, vol. 156, pp. 143-151.
- FRY, B., 2006. *Stable Isotope Ecology*. New York: Springer. 316 p.
- GUARALDO, A.C., KELLY, J.F. & MARINI, M.Â., 2019. Independent trophic behavior & breeding success of a resident flycatcher & a coexisting migratory congener. *Austral Ecology*, vol. 44, no. 1, pp. 126– 137.

- GARCIA-NAVAS, V., FERRER, E.S. & SANZ, J.J., 2012. Plumage yellowness predicts foraging ability in the blue tit *Cyanistes caeruleus*. *Biological Journal of the Linnean Society*, vol. 106, no. 2, pp. 418-429.
- GOODWIN, T.W., 1984. The biochemistry of carotenoids, Vol. 2, Animals. 2nd ed Chapman & Hall, New York.
- GRIFFITH, S.C., OWENS, I. P.F. & THUMAN, K.A., 2002. Extra pair paternity in birds: a review of interspecific variation and adaptive function. *Molecular Ecology*, vol. 11, no. 11, pp. 2195–2212.
- HAWKINS, G.L., HILL, G.E. & Mercadante, A., 2012. Delayed plumage maturation & delayed reproductive investment in birds. *Biological Reviews*, vol. 87, no. 2, pp. 257–274.
- HILL, G.E., 2009. Birds Coloration. Washington: National Geographic. 256p.
- HILL, G.E. & MCGRAW, K.J., eds., 2006. *Bird coloration: Function & evolution*. Cambridge: Harvard University Press.
- HILL, G.E., 2011. Condition-dependent traits as signals of the functionality of vital cellular processes. *Ecology Letters*, vol. 14, no. 7, pp. 625–634.
- HILL, G. E. & JOHNSON, J. D. 2012. The vitamin A–redox hypothesis: a biochemical basis for honest signaling via carotenoid pigmentation. *The American Naturalist*, vol. 180, no. 5, pp. E127-E150.
- HILL, G.E., MONTGOMERIE, R., INOUYE, C.Y. & DALE, J., 1994. Influence of dietary carotenoids on plasma & plumage colour in the house finch: intra- & intersexual variation. *Functional Ecology*, vol. 8, no. 3, pp. 343–350.
- HILL, G. E., WEAVER, R. J. & POWERS, M. J., 2023. Carotenoid ornaments & the sp&rels of physiology: a critique of theory to explain condition dependency. *Biological Reviews*, vol. 98, no. 6, pp. 2320-2332.
- HOBSON, K.A. & CLARK, R.G., 1992. Assessing avian diets using stable isotopes I: turnover of ¹³C in tissues. *The Condor*, vol. 94, no. 1, pp. 181-188.

- HOENIG, B. D., SNIDER, A. M., FORSMAN, A. M., HOBSON, K. A., LATTA, S. C., MILLER, E. T., POLITO, M.J., Powell, L.L., ROGERS, S.L., SHERRY, T.W., TOEWS, D.P.L., WELCH, A.J., TAYLOR, S.S. & Porter, B. A., 2022. Current methods and future directions in avian diet analysis. *The Auk*, vol. 139, no. 1, pp. ukab077.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET, 2024 [acessado em 18 janeiro de 2024] *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa: Dados históricos*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>.
- JACKSON, A.L., INGER, R., PARNELL, A.C. & BEARHOP, S., 2011. Comparing isotopic niche widths among & within communities: SIBER – Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *Journal of Animal Ecology*, vol. 80, no. 3, pp. 595–602.
- JAWOR, J.M. & BREITWISCH, R., 2003. Melanin ornaments, honesty, & sexual selection. *The Auk*, vol. 120, no. 2, pp. 249-265.
- KAPPES, P.J., STUTCHBURY, B.J. & WOOLFENDEN, B.E. 2009. The relationship between carotenoid-based coloration & pairing, within-& extra-pair mating success in the American Redstart. *The Condor*, vol. 111, no. 4, pp. 684-693.
- KERNALÉGUEN, L., ARNOULD, J.P.Y., GUINET, C., CAZELLES, B., RICHARD, P., & CHEREL, Y., 2016. Early-life sexual segregation: ontogeny of isotopic niche differentiation in the Antarctic fur seal. *Scientific reports*, vol. 6, no. 1, pp. 33211.
- KOCH R. E., & HILL G.E., 2018. Do carotenoid-based ornaments entail resource tradeoffs? An evaluation of theory and data. *Functional Ecology*, vol. 32, no. 8; pp.1908–1920.
- LAFOUNTAIN, A.M., PRUM, R.O. & FRANK, H.A., 2015. Diversity, physiology, and evolution of avian plumage carotenoids and the role of carotenoid–protein interactions in plumage color appearance. *Archives of Biochemistry & Biophysics*, vol. 572, pp. 201-212.
- LAYMAN, C.A., ARAÚJO, M.S., BOUCEK, R., HAMMERSCHLAG-PEYER, C.M., HARRISON, E., JUD, Z.R., MATICH, P., ROSENBLATT, A.E., VAUDO, J.J., YEAGER, L.A., POST, D.M. & BEARHOP, S. 2012. Applying stable isotopes to

- examine food-web structure: An overview of analytical tools. *Biological Reviews*, vol. 87, no. 3, pp. 545–562.
- LEITÃO, A.V., HALL, M.L., DELHEY, K., MULDER, R.A. 2019. Female and male plumage colour signals aggression in a dichromatic tropical songbird. *Animal Behaviour*, vol. 150, pp. 285–301.
- LEITÃO, A.V., HALL, M.L., & MULDER, R.A., 2021. Female & male plumage color is linked to parental quality, pairing, and extrapair mating in a tropical passerine. *Behavioral Ecology*, vol. 32, no. 3, pp. 452-463.
- LOZANO, G.A., 1994. Carotenoids, parasites, & sexual selection. *Oikos*, vol. 70, no. 2; pp.309–311.
- LUO, M., LU, G., YIN, H., WANG, L., ATUGANILE, M. & DONG, Z., 2021. Fish pigmentation & coloration: molecular mechanisms & aquaculture perspectives. *Reviews in Aquaculture*, vol. 13, no. 4, pp. 2395–2412
- LYON, B.E. & MONTGOMERIE, R.D., 1986. Delayed plumage maturation in passerine birds: reliable signaling by subordinate males? *Evolution*, vol. 40, no. 3, pp. 605–615.
- MAIA, R., ELIASON, C.M., BITTON, P.P., DOUCET, S.M. & SHAWKEY, M.D., 2013. Pavo: An R package for the analysis, visualization & organization of spectral data. – *Meth. Ecology & Evolution*, vol. 4, no. 10, pp. 906–913.
- MAHONEY, S.M., REUDINK, M.W., CONTINA, A., ROBERTS, K.A., SCHABERT, V.T., GUNTHER, E.G. & COVINO K.M., 2022. A tail of plumage colouration: disentangling geographic, seasonal & dietary effects on plumage colour in a migratory songbird. *Journal of Avian Biology*, vol. 2022, no. 3, pp. e02957.
- MANUNTA, C., 1948. Astaxanthin in insects & other terrestrial arthropods. *Nature*, vol. 162, no. 4112, pp. 298-298.
- MAOKA, T., KAWASE, N., HIRONAKA, M. & NISHIDA, R., 2021. Carotenoids of hemipteran insects, from the perspective of chemo-systematic & chemical ecological studies. *Biochemical Systematics & Ecology*, vol. 95, pp. 104241.

- MARINI, K. L., MCKELLAR, A. E., RATCLIFFE, L. M., MARRA, P. P. & REUDINK, M. W., 2015. Age-related change in carotenoid-based plumage of the American redstart *Setophaga ruticilla*. *Journal of Ornithology*, vol. 156, no. x, pp. 783–793.
- MARTINELLI, L.A., OMETTO, J.P.H.B., FERRAZ, E.S., VICTORIA, R.L., CAMARGO, P.B. & MOREIRA, M.Z. 2009. *Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis*. São Paulo: Oficina de Textos.
- MARTINELLI, L.A., NARDOTO, G.B., SOLTANGHEISI, A., REIS, C.R.G., ABDALLA-FILHO, A.L., CAMARGO, P.B., DOMINGUES, T.F., FARIA, D., FIGUEIRA, A.M., GOMES, T.F., LINS, S.R.M., MARDEGAN, S.F., MARIANO, E., MIATTO, R.C., MORAES, R., MOREIRA, M.Z., OLIVEIRA, R.S., OMETTO, J.P.H.B., SANTOS, F.L.S., SENA-SOUZA, J., SILVA, D.M.L., SILVA, J.C.S.S. & VIEIRA, S.A., 2020. Determining ecosystem functioning in Brazilian biomes through foliar carbon & nitrogen concentrations and stable isotope ratios. *Biogeochemistry*, vol. 117, no. 43, pp. 26842–26848.
- MARTÍNEZ DEL RIO, C., SABAT, P., & ERSON-SPRECHER, R. & GONZALEZ, S.P., 2009. Dietary and isotopic specialization: the isotopic niche of three Cinclodes ovenbirds. *Oecologia*, vol. 161, pp 149– 159.
- MARQUES-SANTOS, F., WISCHHOF, U., ROPER, J.J., RODRIGUES, M., 2018. Delayed plumage maturation explains differences in breeding performance of Safron Finches. *Emu*, vol. 118, no. x, pp. 323–333.
- MATTOS I.D., 2021. *Resposta dos pequenos mamíferos do Cerrado à fragmentação e perda de habitat: uma perspectiva funcional e trófica*. Brasília: Universidade de Brasília. 132 p. Tese de Doutorado em Ecologia.
- MCGRAW, K.J., HILL, G.E., STRADI, R., & PARKER, R.S., 2001. The influence of carotenoid acquisition and utilization on the maintenance of species-typical plumage pigmentation in male American goldfinches (*Carduelis tristis*) and northern cardinals (*Cardinalis cardinalis*). *Physiological and Biochemical Zoology*, vol. 74, no. 6, 843–852.

- MCGRAW, K., BEEBEE, M., HILL, G. & PARKER, R., 2003. Lutein-based plumage coloration in songbirds is a consequence of selective pigment incorporation into feathers. *Comparative Biochemistry Physiology Part B Biochemical & Molecular Biology*, vol. 135, pp. 689–696.
- MCGRAW, K.J., WAKAMATSU, K., CLARK, A.B. & YASUKAWA, K., 2004. Red-winged blackbirds *Agelaius phoeniceus* use carotenoid & melanin pigments to color their epaulets. *Journal of avian Biology*, vol. 35, pp. 543–550.
- MCGRAW, K.J., 2006. The mechanics of carotenoid coloration in birds. IN G. E. HILL & K. J. MCGRAW, eds. *Bird coloration: mechanisms & measurements*. Cambridge: Harvard University Press. Pp. 177–242.
- MCGRAW, K.J., 2008. An update on the honesty of melanin-based color signals in birds. *Pigment Cell & Melanoma Research*, vol. 21, no. 2, pp. 133-138.
- MAHLER, B., ARAUJO, L.S. & TUBARO, P.L., 2003. Dietary & sexual correlates of carotenoid pigment expression in dove plumage. *The Condor*, vol. 105. No. 2, pp. 258-267.
- MINAGAWA, M. & WADA, E., 1984. Stepwise enrichment of ¹⁵N along food chains: further evidence & the relation between of ¹⁵N & animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 48, no. x, pp. 1135–1140.
- MONTGOMERIE, R., 2006. Cosmetic & adventitious colors. In: G. E. Hill, G. E. & K. J. McGraw, eds. *Bird coloration: Bird coloration: mechanisms & measurements*. Cambridge: Harvard University Press. pp. 177–242
- MONTGOMERIE, R., 2008. CLR, version 1.05. Queen's University, Kingston. Disponible em: <http://post.queensu.ca/~mont/color/analyze.html>.
- MOLLER, A.P., BIARD, C., BLOUNT, J.D., HOUSTON, D.C., NINNI, P., SAINO, N. & SURAI, P.F., 2000. Carotenoid-dependent signals: indicators of foraging efficiency, immunocompetence or detoxification ability? *Poultry & Avian Biology Reviews*, vol. 11, no. 3, 137-160.

- NAVARA, K.J. & HILL, G.E., 2003. Dietary carotenoid pigments & immune function in a songbird with extensive carotenoid-based plumage coloration. *Behavioral Ecology*, vol. 14, pp. 909–916.
- NAVARRO, A.B., MAGIOLI, M., MOREIRA, M.Z. & SILVEIRA, L.F., 2022. Perspectives & challenges on isotopic ecology of terrestrial birds in Brazil. *Zoologia (Curitiba)*, vol. 39, pp. e21023.
- NAVARRO, A.B., BOGONI, J.A., MOREIRA, M.Z. & SILVEIRA, L.F., 2023. Intraguild niche partitioning in granivorous birds from the late past. *Avian Research*, vol. 14, pp. 100075.
- NAVARRO, A.B., MAGIOLI, M., BOGONI, J.A., SILVEIRA, L.F., MOREIRA, M.Z., ALEX&RINO, E.R., LUZ, D.T.A., SILVA, W.R., PIZO, M.A., OLIVEIRA, V.C. & FERRAZ, K.M.P.M.B., 2021a. Isotopic niches of tropical birds reduced by anthropogenic impacts: a 100-year perspective. *Oikos*, vol. 130, no. 11, pp. 1892–1904.
- NAVARRO, A.B., MAGIOLI, M., BOGONI, J.A., MOREIRA, M.Z., SILVEIRA, L.F., ALEX&RINO, E.R., LUZ, D.T.A., PIZO, M.A., SILVA, W.R., OLIVEIRA, V.C., DONATELLI, R.J., CHRISTIANINI, A.V., PIRATELLI, A.J. & FERRAZ, K.M.P.M.B., 2021B. Human-modified landscapes narrow the isotopic niche of neotropical birds. *Oecologia* 196: 171–184.
- NEWSOME, S.D., MARTÍNEZ DEL RIO, C.M., BEARHOP, S. & PHILLIPS, D.L., 2007. A niche for isotopic ecology. *Frontiers in Ecology & the Environment*, vol. 5, no. 8, pp.429–436.
- NEWSOME, S.D., YEAKEL, J.D., WHEATLEY, P.V. & TINKER, M.T., 2012. Tools for quantifying isotopic niche space and dietary variation at the individual and population level. *Journal of Mammalogy*, vol. 93, no. 2, pp. 329-341.
- NOLAZCO, S., DELHEY, K., FAN, M., HALL, M.L., KINGMA, S.A., ROAST, M.J., TEUNISSEN, N. & PETERS, A., 2023. Which plumage patches provide information about condition & success in a female fairy-wren? *Behavioral Ecology*, vol. 34, no. 1, pp. 50-62.

- OLIVEIRA, A.C.B., MARTINELLI, L.A., MOREIRA, M.Z., SOARES, M.G.M. & CYRINO, J.E.P., 2006. Seasonality of energy sources of *Colossoma macropomum* in a floodplain lake in the Amazon–lake Camaleão, Amazonas, Brazil. *Fisheries Management & Ecology*, vol. 13, no. 3, pp. 135-142.
- OLSON, A.V., 2006. Estimating nutrient intake in comparative studies of animals: an example using dietary carotenoid content in birds. *oikos*, vol. 112, no. 3, pp. 620-628.
- OGILVY, V., PREZIOSI, R.F., & FIDGETT, A.L. 2012. A brighter future for frogs? The influence of carotenoids on the health, development and reproductive success of the red-eye tree frog. *Animal Conservation*, vol. 15, no. 5, pp. 480-488.
- OSINUBI, S. T., MCGRAW, K. J., OTTOSSON, U., BROWN, J. A., BRISKIE, J. V., & CHAPMAN, H. M. 2018. Carotenoid-based plumage pigmentation and concentration as a function of sex and habitat type in the Yellow-breasted Boubou *Laniarius atroflavus*. *Ostrich*, vol. 89, no. 3, pp. 259-264.
- OORTWIJN, T., DE MONTE, L.G., VARLEY, D.P., VAN DER MEER, M.T. & VAN GILS, J.A., 2023. Tissue- & diet-dependent stable carbon & nitrogen isotope discrimination: a calibration study in a captive shorebird species. *Journal of Avian Biology*, e03094.
- PAGANI-NÚÑEZ, E.M.I.L.I.O., & Senar, J.C. 2012. Changes in carotenoid-based plumage colour in relation to age in European Serins *Serinus serinus*. *Ibis*, vol. 154, no. 1, pp. 155-160.
- PAGANI-NÚÑEZ, E., BARNETT, C.R. & SENAR, J.C., 2019. Age & sex differences in niche use at molt & its effect on plumage coloration characteristics in a bird. *Current zoology*, vol. 65, no. 3, pp. 251-260.
- PALMERIO, A.G. & MASSONI, V., 2009. Reproductive biology of female Saffron Finches does not Differ by the Plumage of the Mate. *Condor*, vol.111, no. 4, pp.715–721.
- PARKER, H. & HOLM, H., 1990. Patterns of nutrient & energy expenditure in female common eiders nesting in the high Arctic. *Auk*, vol. 107, no. 4; pp. 660–668.

- PENEAUX, C., HANSBRO, P.M. & GRIFFIN, A.S. 2020. The potential utility of carotenoid-based coloration as a biomonitor of environmental change. *Ibis*, vol. 163, no. 1, pp. 20-37.
- PEREIRA, Z.P., 2011. *Influência dos recursos alimentares sobre a reprodução de Neothraupis fasciata (Aves, Thraupidae)*. Brasília: Universidade de Brasília. 47p. Dissertação de Mestrado em Ecologia.
- PEREIRA, A.C., NARDOTO, G.B. & COLLI, G.R. 2023. Sources of intraspecific variation in the isotopic niche of a semi-aquatic predator in a human-modified landscape. *PeerJ*, vol. 11, pp. e15915.
- PINTO, J.R.R., LENZA, E., PINTO, A.S. 2009. Composição florística e estrutura da vegetação arbustivo-arbórea em um cerrado rupestre, Cocalzinho de Goiás, Goiás. *Revista Brasileira de Botânica*, vol. 32, pp. 1–10.
- PRICE, J.J., 2019. Sex differences in song and plumage color do not evolve through sexual selection alone: new insights from recent research. *Journal of Ornithology*, vol. 160, pp. 1213–1219.
- PRUM, R.O., 2006. Anatomy, physics, & evolution of avian structural colors. In: G. E., Hill, & K. J. McGraw, eds. *Bird coloration: mechanisms & measurements*. Cambridge: Harvard University Press. pp. 295–353.
- PRYKE, S.R., & ERSSON, S., LAWES, M.J. & PIPER, S.E., 2002. Carotenoid status signaling in captive and wild, red-collared widowbirds: independent effects of badge size & color. *Behavioral Ecology*, vol. 13, no. 5, pp. 622-631.
- POMPERMAIER, V.T., POTAPOV, A M. & NARDOTO, G.B. 2022. Legacy effects of nutrient addition reduces & displaces trophic niches in Collembola communities in a Brazilian woodl& savanna. *Applied Soil Ecology*, vol. 77, 104547.
- POST, D.M., 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods & assumptions. *Ecology*, vol. 83, no. 3, pp. 703–718.
- RAMIREZ-OTAROLA, N., OPORTO, J. & SABAT, P. 2024. Dietary effects on innate immune state among individuals of *Diuca diuca*. *Journal of Ornithology*, pp. 1-5.

- R Core Team, 2023. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>.
- REUDINK, M.W., MARRA, P.P., BOAG, P.T. & RATCLIFFE, L.M., 2009. Plumage colouration predicts paternity & polygyny in the American redstart. *Animal Behaviour*, vol. 77, no. 2, pp. 495–501.
- REUDINK, M.W., MCKELLAR, A.E., MARINI, K.L., MCARTHUR, S.L., MARRA, P. P. & RATCLIFFE, L.M. 2015. Inter-annual variation in American redstart (*Setophaga ruticilla*) plumage colour is associated with rainfall & temperature during moult: an 11-year study. *Oecologia*, vol. 178, no. pp. 161-173.
- RISING, J. & JARAMILLO, A., 2024. Saffron Finch (*Sicalis flaveola*). In: J. DEL HOYO, A. ELLIOTT, J. SARGATAL, et al., eds. *Handbook of the Birds of the World Alive*. Barcelona: Lynx Edicions. Retirado de [http:// www. hbw. com/ node/ 62084](http://www.hbw.com/node/62084). Acessado em 12 de janeiro de 2024.
- ROHWER, S. A. 1975. The social significance of avian winter plumage variability. *Evolution*, vol. 29, no. 4, pp. 593-610.
- SAKS, L., MCGRAW, K. & HÖRAK, P., 2003. How feather colour reflects its carotenoid content. *Functional Ecology*. vol. 17, no. 4, pp. 555–561.
- SANTOS, E.S.A., SCHECK, D., & NAKAGAWA, S., 2011. Dominance & plumage traits: meta-analysis & metaregression analysis. *Animal Behavior*, vol. 82, no.1, pp. 3–19.
- SHULTZ, A.J. & BURNS, K.J. 2017. The role of sexual & natural selection in shaping patterns of sexual dichromatism in the largest family of songbirds (Aves: Thraupidae). *Evolution*, vol. 71, pp. 1061–1074.
- SENAR, J.C., & ESCOBAR, D., 2002. Carotenoid derived plumage coloration in the siskin *Carduelis spinus* is related to foraging ability. *Avian Science*, vol. 2, no. 1, pp. 19-24.
- SENAR, J.C., 2006. Color displays as intrasexual signals of aggression & dominance in birds. In: G. E., HILL & K.J. MCGRAW, K. J., eds. *Bird coloration: function & evolution*. Cambridge: Harvard University Press. pp. 87-136

- SENAR, J.C., MØLLER, A.P., RUIZ, I., NEGRO, J.J., BROGGI, J. & HOHTOLA, E., 2010. Specific appetite for carotenoids in a colorful bird. *PLoS One*, vol. 5, no. 5, pp. e10716.
- SICK, H., 2001. *Ornitologia Brasileira*. Nova Fronteira: Rio de Janeiro.
- SILVA, N.A.P., FRIZZAS, M.R. & OLIVEIRA, C. M. 2011. Seasonality in insect abundance in the " Cerrado" of Goiás State. *Brazil. Revista Brasileira De Entomologia*, vol. 55, no. 1, pp. 79–87.
- SIMONS, M.J.P., COHEN, A.A. & VERHULST, S., 2012. What does carotenoid-dependent coloration tell? Plasma carotenoid level signals immunocompetence & oxidative stress state in birds—a meta-analysis. *Plos One*, vol.7, no. 8, pp. e43088.
- SIMONS, O.G., MANU, S.A., NWAOGU, C.J., & OMOTORIOGUN, T.C., 2023. Supplementing a grain diet with insects instead of fruits sustains the body condition of an omnivorous bird. *Ecology & Evolution*, vol. 13, no. 5, pp. e10141.
- SILVEIRA, L.F & MÉNDEZ, A.C., 1999. Caracterização das formas brasileiras do gênero *Sicalis* (Passeriformes, Emberizidae). *Atualidades Ornitológicas*, vol. 90, pp. 6–8.
- SPARROW, K.L., DONKOR, K.K., FLOOD, N.J., MARRA, P.P., PILLAR, A.G. & REUDINK, M.W. 2017. Conditions on the Mexican moulting grounds influence feather colour & carotenoids in Bullock’s orioles *Icterus bullockii*. *Ecology & Evolution*, vol. 7, pp. 2643–2651.
- STRADI, R., CELENTANO, G., ROSSI, E., ROVATI, G. & PASTORE, M., 1995. Carotenoids in bird plumage – I. The carotenoid pattern in a series of Palearctic Carduelinae. *Comparative Biochemistry & Physiology Part B: Biochemistry & Molecular Biology*, vol. 110, pp. 131-143.
- STRADI, R., 1999. in *Colori in volo: il piumaggio degli uccelli* (eds. Brambilla, L. et al.) 117–146 (Universita degli Studi di Milano, 1999).
- STEFFEN, J. E., & MCGRAW, K.J., 2009. How dewlap color reflects its carotenoid and pterin content in male and female brown anoles (*Norops sagrei*). *Comparative Biochemistry & Physiology Part B: Biochemistry & Molecular Biology*, vol. 154, no. 3, pp. 334-340.

- STEPHENS, R.B., OUIMETTE, A.P., HOBBIE, E.A. & ROWE, R.J., 2022. Reevaluating trophic discrimination factors ($\Delta^{13}\text{C}$ & $\Delta^{15}\text{N}$) for diet reconstruction. *Ecological Monographs*, vol. 92, no. 3, pp. e1525.
- STODDARD, M.C. & PRUM, R.O., 2011. How colorful are birds? Evolution of the avian plumage color gamut. *Behavior Ecology*, vol. 22, pp. 1042–52.
- SVENSSON, P.A. & WONG, B.B.M., 2011. Carotenoid-based signals in behavioural ecology: A review. *Behaviour*, 148, 131–189.
- SWANSON, H. K., LYSY, M., POWER, M., STASKO, A.D., JOHNSON, J.D. & REIST, J.D. 2015. A new probabilistic method for quantifying n-dimensional ecological niches & niche overlap. *Ecology*, vol. 96, no. 2, pp. 318-324.
- THIBAULT, E., MAHONEY, S.M., BRISKIE, J.V., SHAIKH, M. & REUDINK, M.W., 2022. Extra-pair paternity drives plumage colour elaboration in male passerines. *Plos one*, vol. 17, no. 8, pp. e0273347.
- TONRA, C.M., MARINI, K.L., MARRA, P.P., GERMAIN, R.R., HOLBERTON, R.L. & REUDINK, M.W., 2014. Color expression in experimentally regrown feathers of an overwintering migratory bird: implications for signaling & seasonal interactions. *Ecology & Evolution*, vol. 4, pp. 1222–1232.
- QUELLER, P.S. & MURPHY, T.G., 2017. Seasonal variation in the utility of a status signaling system: plumage ornament predicts foraging success only during periods of high competition. *PLoS ONE* vol. 12, pp. e0185584
- QUILLFELDT, P., BUGONI, L., MCGILL, R. A., MASELLO, J.F. & FURNESS, R. W. 2008. Differences in stable isotopes in blood & feathers of seabirds are consistent across species, age & latitude: implications for food web studies. *Marine Biology*, vol. 155, pp. 593-598.
- VANDER ZANDEN, M.J, CLAYTON M.K., MOODY E.K. ET AL .2015. Stable isotope turnover & half-life in animal tissues: a literature synthesis. *Plos One*, vol. 10, no. 1, pp. e0116182

- VENABLE, G.X., GAHM, K., & PRUM, R.O., 2022. Hummingbird plumage color diversity exceeds the known gamut of all other birds. *Communications Biology*, vol. 5, no. 1, pp. 576.
- WALKER, L. K., THOROGOOD, R., KARADAS, F., RAUBENHEIMER, D., KILNER, R. M. & EWEN, J. G. 2014. Foraging for carotenoids: do colorful male hihi target carotenoid-rich foods in the wild? *Behavioral ecology*, vol. 25, no. 5, pp. 1048-1057.
- WARD, G.M., MAHONEY, S.M., JOLY, S. & REUDINK, M.W., 2021. Effects of age & weather during moult on mountain bluebird *Sialia currucoides* structural colouration. *Journal of Avian Biology*, vol. 52, pp. 1–12.
- WEAVER, R.J., KOCH, R.E. & HILL, G.E, 2017. What maintains signal honesty in animal colour displays used in mate choice? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 372, pp. 20160343.
- . WEAVER, R.J., SANTOS, E.S.A., TUCKER, A.M., WILSON, A.E. & HILL, G.E., 2018. Carotenoid metabolism strengthens the link between feather coloration & individual quality. *Nature Communications*, vol. 9, pp. 73.
- WILSON, J.D., MORRIS, A.J., ARROYO, B.E., CLARK, S.C. & BRADBURY, R. B., 1999. A review of the abundance & diversity of invertebrate & plant foods of granivorous birds in northern Europe in relation to agricultural change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 75, pp. 13–30.
- WHITE, T.E., 2020. Structural colours reflect individual quality: a meta-analysis. *Biology Letters*, vol. 16, no. 4, 20200001.
- YEAKEL, J.D., BHAT, U., SMITH, E.A. & NEWSOME, S.D., 2016. Exploring the isotopic niche: Isotopic variance, physiological incorporation, & the temporal dynamics of foraging. *Frontiers in Ecology & Evolution*, vol. 4, no. 1.
- ZAHAVI, A., 1975. Mate selection—a selection for a handicap. *Journal of Theoretical Biology*, vol. 53, no., pp. 205–214.