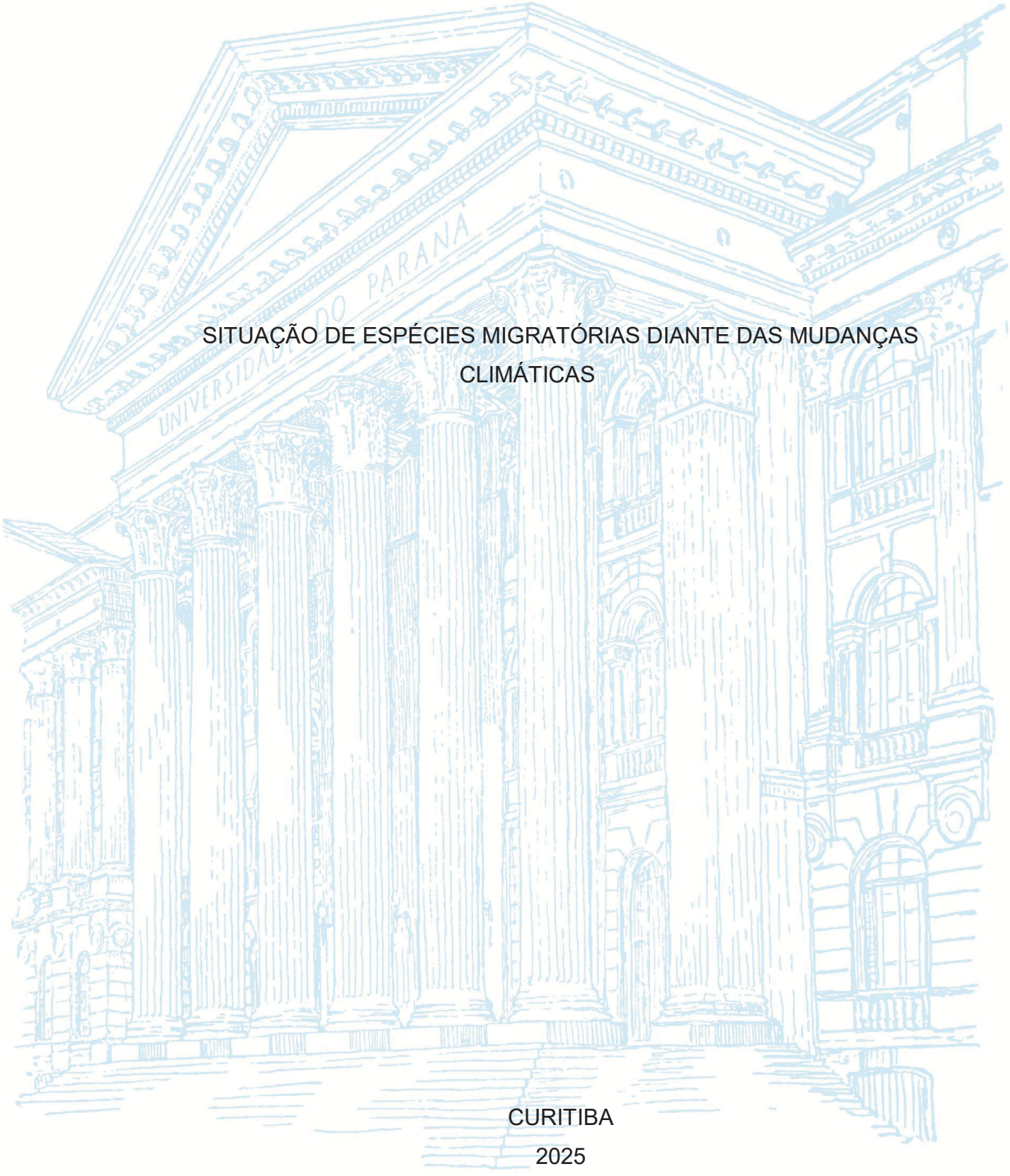
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRENO TODESCO NOGUEROL CORRÊA



SITUAÇÃO DE ESPÉCIES MIGRATÓRIAS DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

CURITIBA

2025

BRENO TODESCO NOGUEROL CORRÊA

SITUAÇÃO DE ESPÉCIES MIGRATÓRIAS DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Jean Ricardo Simões Vitule

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Corrêa, Breno Todesco Noguerol
Situação de espécies migratórias diante das mudanças climáticas / Breno Todesco Noguerol Corrêa. – Curitiba, 2025.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientador: Jean Ricardo Simões Vitule

1. Animais migratórios. 2. Mudanças climáticas. 3. Sustentabilidade e meio ambiente. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Vitule, Jean Ricardo Simões. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA AMBIENTAL - 40001016075P3

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **BRENO TODESCO NOGUEROL CORRÊA**, intitulada: **Situação de espécies migratórias diante das mudanças climáticas**, sob orientação do Prof. Dr. JEAN RICARDO SIMÕES VITULE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 10 de Março de 2025.

Assinatura Eletrônica
12/03/2025 11:35:56.0
JEAN RICARDO SIMÕES VITULE
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
11/03/2025 09:42:07.0
MICHAEL MANNICH
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
12/03/2025 09:43:55.0
NATALI OLIVA ROMAN MIILLER
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

À minha família, que sempre esteve presente em minha caminhada e me apoiou nos momentos mais difíceis, sempre me fazendo acreditar que eu poderia alcançar todos os meus sonhos. Sempre que me sinto inseguro, fico mais confortável sabendo que sempre estarão lá para mim.

À minha noiva, que é meu porto seguro, sempre ao meu lado me motivando e trazendo os momentos mais felizes. Sem suas palavras e sua ajuda, nunca teria chegado onde estou, e com você acredito que posso chegar onde quiser.

Ao meu orientador, professor Dr. Jean Ricardo Simões Vitule, sempre prestativo e me guiou com sua sabedoria nesta trajetória.

Aos integrantes da banca de defesa, Dr. Michael Mannich e Dra. Natali Miiller, e à integrante da banca de qualificação, Dra. Larissa Faria, que contribuíram significativamente com as reflexões teóricas para o desenvolvimento e os resultados da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Enfim, a todas as pessoas que de alguma forma estiveram presentes em minha jornada e contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Os impactos desencadeados pelas mudanças climáticas no último século têm aumentado a pressão sofrida por inúmeras espécies de animais, e algumas das mais vulneráveis a essas alterações são as espécies migratórias. Os movimentos migratórios acompanham sinais sazonais, dependendo da disponibilidade de alimentos de maneira síncrona a sua cronologia. É fundamental, portanto, investigar como as espécies migratórias estão sendo afetadas pelas alterações no clima, e quais impactos podem surgir à medida que essas mudanças são amplificadas. Tendo em vista este cenário, o objetivo deste estudo é concatenar uma grande quantidade de dados de diversos estudos sobre espécies migratórias e mudanças climáticas, filtrados de maneira sistemática da base de dados da Web of Science, para evidenciar quais são as principais tendências e lacunas, bem como obter uma visão mais ampla de como as espécies migratórias estão sendo impactadas pelas mudanças no clima, assim ajudando outros pesquisadores interessados a estudar o tema a encontrarem um ponto de partida. Entre as tendências encontradas, destacam-se a predominância de estudos realizados no norte global e o foco em aves migratórias. Por outro lado, foram detectadas grandes lacunas no conhecimento sobre as respostas de outros grupos às mudanças climáticas e sobre espécies do hemisfério sul. Quanto às principais alterações apresentadas por espécies migratórias, as mais reportadas foram mudanças na cronologia da migração, como tentativa de se adaptar ao adiantamento do pico de alimentos causado pelos aumentos de temperatura, e mudanças de distribuição, com muitas espécies se deslocando em direção aos polos, maiores altitudes, bem como aumentando ou reduzindo suas rotas migratórias. Dessa forma, este estudo reforça a necessidade de pesquisas mais abrangentes e geograficamente diversificadas, e evidencia a urgência de compreender melhor as consequências dessas mudanças para a conservação de espécies migratórias e dos ecossistemas dos quais elas dependem.

Palavras-chave: Espécies migratórias; mudanças climáticas; revisão sistemática.

ABSTRACT

The impacts triggered by climate change in the last century have increased the amount of pressure suffered by countless species of animals, and some of the most vulnerable to these changes are migratory species. Considering they base their migratory movements on climatic cues, and depend on habitats having food abundance synchronously to their migrations, the need to study how these animals are being affected by climate change, and how they will be affected as temperatures continue to increase, becomes clear. Having this in mind, the goal of this study is to concatenate a large amount of data from various studies about migratory species and climate change, filtered systematically through the Web of Science database, to highlight the main trends and gaps, as well as to obtain a broader view of how migratory species are being affected by climate change, thus helping other researchers interested in studying the topic to find a starting point. Some of the most noticeable trends found were of studies being carried out on the global north, and of researchers choosing migratory birds for their case studies, meanwhile knowledge about the responses of other animal groups, and species that inhabit the south of the planet, are major gaps. As for the main changes presented by migratory species, the most commonly reported were changes in the timing of migration, as an attempt to adapt to the advance of the food peak caused by increasing temperatures, and changes in distribution, with many species moving towards the poles, higher altitudes, as well as increasing or reducing migratory routes. Thus, this study reinforces the need for more comprehensive and geographically diverse research, and highlights the urgency of better understanding the consequences of these changes for the conservation of migratory species and the ecosystems they depend on.

Keywords: Migratory species; climate change; systematic review.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18
2.1 ESPÉCIES MIGRATÓRIAS E O CLIMA 18
2.2 AS MUDANÇAS E SUAS CONSEQUÊNCIAS 20
2.3 EXEMPLOS DE ESPÉCIES MIGRATÓRIAS IMPACTADAS POR MUDANÇAS CLIMÁTICAS 25
2.3.1 Papa-moscas-preto cruzando o Saara 26
2.3.2 Andorinha-do-ártico na mais longa migração do mundo 27
2.3.3 As renas e as mudanças no clima ártico 28
2.3.4 A migração do Serengueti e sua influência em predadores nativos 29
2.3.5 As borboletas e o El Niño 30
2.3.6 Insetos migratórios e os riscos à produção agrícola 31
2.3.7 Impacto na economia e conservação: o problema de peixes migratórios 32
2.3.8 As migrações entre rio e mar 33
2.3.9 Tartarugas-marinhas e as mudanças climáticas 34
3 MATERIAIS E MÉTODOS 36
4 RESULTADOS 43
4.1 ESTADO DA ARTE: TIPOS DE ESTUDOS E ANIMAIS ESTUDADOS 43
4.2 INDICADORES ANALISADOS 54
5 DISCUSSÃO 63
6 CONCLUSÕES 76
REFERÊNCIAS 78

1 INTRODUÇÃO

A migração é uma tática comum adotada por muitas espécies de animais para lidar com as mudanças sazonais no habitat e na disponibilidade de recursos, ocasionando movimentos direcionados sobre pequenas e grandes escalas (Dingle e Drake, 2007). Esses movimentos coincidem com alterações sazonais em ambientes (Abrahams et al., 2019), e são limitados a combinar com exigências essenciais na história de vida destes animais (Cox, 1985). Muitos pássaros, por exemplo, migram de suas áreas de reprodução para evitar períodos adversos do ciclo anual, se deslocando, muitas vezes por milhares de quilômetros, para regiões com clima mais ameno, onde têm maiores chances de sobreviver e se preparar para a próxima temporada de reprodução (Alerstam, 1990).

Os mecanismos evolutivos que sustentam o comportamento migratório são complexos e refletem tanto aspectos ecológicos quanto biogeográficos. A vantagem adaptativa de acompanhar sazonalmente habitats que variam na distribuição de recursos, condições ambientais e competição é fundamental para a sobrevivência das espécies migratórias (Fryxell e Sinclair, 1988). Em muitos ecossistemas, as variações sazonais nas condições ambientais definem uma janela de tempo ideal para atividades críticas, como reprodução, migração e hibernação. Essa janela é moldada por fatores climáticos e pela fenologia dos níveis tróficos adjacentes, cuja interação é crucial no contexto das mudanças climáticas (Visser e Both, 2005).

As mudanças climáticas têm provocado um impacto crescente e contínuo sobre ecossistemas, habitats e espécies, intensificando a magnitude desses efeitos com o tempo (Lindbladh et al., 2000), alterando a fenologia e distribuição de muitas espécies de plantas e animais, e resultando em mudanças desde o nível individual, até o de comunidades inteiras (Cotton, 2003). Eventos como a abertura de folhas (Menzel e Fabrian, 1999), floração (Fitter e Fitter, 2002), e reprodução de insetos (Myneni et al. 1997; McCarty 2001), estão todos adiantados, o que pode significar uma discordância com os eventos fenológicos de espécies migratórias, que dependem da sincronização do período de reprodução ao pico de disponibilidade de alimento para obterem sucesso (Visser et al., 2006). Assim, a capacidade de adaptar suas migrações em sintonia com as variações na disponibilidade de alimento é crucial para a sobrevivência destas espécies. Entretanto, o ritmo acelerado das mudanças antropogênicas têm levantado questões sobre a capacidade das

populações de se adaptarem a essas transformações rápidas (Gaston, 2003). Mudanças na previsibilidade de habitats adequados diante das mudanças no clima, podem resultar em espécies tendo que viajar mais longe, iniciar seu deslocamento mais cedo, e migrar por mais tempo, assim gastando mais energia (Van Buskirk *et al.*, 2009, Miles *et a*l, 2017, Howard *et al.*, 2018, p.3).

Nesse cenário, estudos empíricos têm se tornado essenciais para estimar a velocidade da adaptação climática e identificar os processos subjacentes (Bay *et al.*, 2018). Embora algumas espécies possuam variação genética e plasticidade migratória suficientes para responder rapidamente às mudanças ambientais (Liedvogel *et al.*, 2011), a contínua mudança no ambiente apresentará uma crescente pressão sobre essas espécies, e possivelmente muitas delas não conseguirão se adaptar rápido o suficiente.

É nesse contexto, que foi desenvolvida esta pesquisa, que tem como tema o gerenciamento de dados de espécies migratórias diante das mudanças climáticas. Nessa perspectiva, como problema do estudo, procura-se responder às seguintes questões: (i) Como são as principais tendências e lacunas na compreensão dos fenômenos migratórios perante as mudanças climáticas?; (ii) Quais são os indicadores mais importantes a serem analisados em um estudo de migrações e mudanças climáticas?; (iii) Como os animais migratórios estão sendo afetados pelas mudanças climáticas?; (iv) Quais consequências podem ser esperadas devido às alterações nos movimentos migratórios.

Como objetivo geral, o estudo pretende analisar o estado de espécies migratórias e dos estudos relacionados a elas diante das mudanças climáticas. Para os objetivos específicos: (i) concatenar dados espaço-temporais sobre estado da arte a respeito de espécies migratórias; (ii) Avaliar quais são os indicadores mais utilizados nos estudos analisados; (iii) Verificar o que dizem os indicadores sobre as alterações nos fenômenos migratórios; (iv) Reunir informações e discutir sobre as consequências atuais e a longo prazo das alterações em fenômenos migratórios.

O estudo justifica-se pela necessidade de desenvolver abordagens inovadoras e mais eficientes para coletar, organizar e analisar dados relacionados às espécies migratórias. Tais abordagens podem contribuir para a elaboração de políticas ambientais mais eficazes, além de fornecer subsídios para ações mitigadoras que garantam a sobrevivência das espécies e a manutenção dos ecossistemas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESPÉCIES MIGRATÓRIAS E O CLIMA

A migração é um comportamento inerente a milhões de indivíduos pertencentes aos mais variados grupos taxonômicos no reino animal, e é um mecanismo vital para o manter o equilíbrio dos ecossistemas.

Para os indivíduos participantes nessa rede de movimentos, as migrações representam a oportunidade de aproveitar recursos de “dois mundos”, termo estabelecido por Greenberg e Marra, em 2005, que descreve de maneira apropriada os comportamentos migratórios. De acordo com Dingle (2014), se movendo através do espaço e tempo, migrantes conseguem reduzir os efeitos das variações extremas em seu ambiente, saindo de seus habitats, onde os recursos estão se deteriorando ou tendo sua disponibilidade reduzida, para colonizar ou obter refúgio em habitats onde os recursos são mais disponíveis. Essa relação é o que molda o comportamento, e a história de vida destes animais.

Primeiramente, para compreender as relações entre migrações e clima, é necessário entender o que implica a palavra migração neste contexto. A maioria dos movimentos no reino animal, ocorrem em áreas relativamente limitadas, definidas como área residencial, por Roshier e Reid (2003), como o local onde organismos viajam apenas para encontrar os recursos que precisam para sobreviver e se reproduzir. A distância desses movimentos depende de diversos fatores, incluindo as condições ecológicas do habitat, além do tamanho, poder de movimento, e características de alimentação e reprodução destes residentes (Roshier e Reid, 2003). A região onde essas áreas residenciais ocorrem e que providenciam os recursos necessários para cada fase do ciclo de vida, é o habitat (Southwood, 1981). Diferente da maioria dos movimentos no reino animal, as migrações, geralmente iniciadas antes do declínio dos recursos, leva um indivíduo de um habitat para outro, com uma nova área residencial (Dingle e Drake, 2007).

Definindo migrações de maneira mais objetiva, Dingle e Drake (2007) estabeleceram quatro conceitos adjacentes: (i) um tipo de locomoção que seja notavelmente persistente, não distraída e direta; (ii) uma realocação do organismo que esteja numa escala muito maior, e que envolva movimento de muito mais longa duração, do que àqueles provenientes da coleta diária de recursos, como

forrageamento; (iii) um movimento de ida e volta sazonal de uma população entre regiões que alternam entre favoráveis e desfavoráveis (incluindo uma região onde ocorre reprodução); e (iv) movimentos levando à redistribuição com uma população espacialmente estendida.

Migrações anuais longas, são as que provavelmente tem-se mais familiaridade, devido a suas grandes escalas, cobrindo enormes porções do planeta, porém elas também podem ocorrer em escalas muito menores, como é o caso para alguns insetos, por exemplo, com distâncias de apenas algumas centenas ou milhares de metros. Todas elas envolvem reprodução em uma das pontas do caminho, e a maioria, refúgio na outra ponta, para escapar de situações sazonais extremas. Assim como todas as jornadas migratórias, há uma enorme quantidade e variabilidade, mas todas apresentam características que as definem como comportamento migratório (Dingle, 2014). Pode-se afirmar então, que, comportamentos migratórios estão entrelaçados ao clima, e que este é o fator determinante que dá origem às migrações, e que promove seu sucesso ou fracasso.

Os movimentos migratórios tendem a ser induzidos por mudanças nas estações, e por sinais climáticos trazidos por elas (Ball, 1983), então quando trazemos o contexto das mudanças climáticas, fica evidente o motivo pelo qual espécies migratórias são especialmente afetadas.

Mudanças climáticas recentes estão associadas a mudanças dramáticas na fenologia de animais e plantas (Moller *et al*., 2008), porém, essas mudanças podem não ser harmoniosas. O termo mudanças climáticas globais, tem a conotação de aumento de temperaturas médias em todos os lugares, e durante todo o ano, porém este não é o caso (IPCC, 2001), e cada espécie é afetada de maneira diferente, dependendo de vários fatores individuais e de habitat. Sendo assim, desencontros na janela de tempo entre níveis tróficos adjacentes podem ocorrer (Visser e Both, 2005), o que pode ser um fator determinante para o fracasso de espécies migratórias, que dependem de sincronizar sua fenologia à dos níveis adjacentes para obter sucesso reprodutivo, e sobreviver em seu novo habitat (Cotton, 2003).

Evidências crescentes apontam que a fenologia de plantas e animais ao redor do mundo têm avançado devido às mudanças climáticas (Hüppop e Winkel, 2006, Spottiswoode *et al*., 2006, Gienapp *et al*., 2007, Moller *et al*., 2008), entretanto, algumas espécies podem não ter plasticidade o suficiente para avançar suas migrações. Isso é um fator especialmente importante para migrantes de longas

distâncias, em consequência de que, enquanto estão em uma das pontas de suas rotas migratórias, esses animais têm poucos ou nenhum sinal disponíveis para prever a cronologia do pico de disponibilidade de alimento na outra ponta, a milhares de quilômetros de distância (Both *et al*. 2006). Além disso, migrações longas geralmente levam algumas semanas entre saída e chegada, o que reduz a oportunidade de ajustar a cronologia da viagem para encaixar com o pico de alimentos (Both e Marvelde, 2007). O desencontro dessa cronologia entre níveis tróficos adjacentes tem um alto custo para essas espécies, e se caracteriza com populações declinando (Moller *et al*., 2008).

Na seção seguinte, serão mais aprofundados os conceitos da fenologia das espécies migratórias, e a importância de combinar a cronologia de suas migrações ao pico de alimento disponível, além disso apresentando consequências enfrentadas por estas espécies quando esta cronologia não é adequada.

2.2 AS MUDANÇAS E SUAS CONSEQUÊNCIAS

As elevações nas temperaturas médias globais têm resultado no avanço das migrações de diversos animais na primavera, contudo, a extensão desse avanço varia muito entre diferentes espécies (Cotton, 2003, Jenni e Kery, 2003, Chambers, 2005, Spottiswoode *et al*., 2006, Both e Marvel, 2007, Gienapp *et al*., 2007, Peer e Miller, 2014). Muitas espécies apresentam também o avanço de outras funções fenotípicas, como o avanço progressivo da reprodução detectado nas aves (Both e Marvelde, 2007). Segundo Anthes (2004), as aves geralmente procuram chegar em seus territórios de reprodução o mais cedo que as condições permitirem, visando maximizar seu sucesso reprodutivo.

Esse avanço, identificado em diversas espécies, pode ser explicado pelo adiantamento da disponibilidade de recursos nos territórios de reprodução (Hedenström *et al*., 2007), e muitas vezes são melhores aproveitados por indivíduos mais experientes (Bulluck *et al*., 2013).

Para as aves migratórias, a cronologia de sua chegada e sua condição física nos locais de reprodução são determinantes para o sucesso reprodutivo (Cotton, 2003).

Apesar de muitos migrantes terem avançado sua chegada ou passagem nas últimas décadas, algumas espécies, especialmente as migratórias de longas

distâncias, podem enfrentar restrições, devido ao seu comportamento amplamente herdado, sendo assim, inflexíveis a mudanças em sua fenologia (Cotton, 2003, Both e Marvelde, 2007, Miller-Rushing *et al*., 2008).

Além disso, estudos mostram que migratórias de curtas distâncias são mais influenciadas por temperaturas locais, enquanto as de longas distâncias são afetadas pelo clima no início, ou no percurso, de suas migrações, que podem estar mudando de maneiras amplamente diferentes (Both e Visser, 2001), assim causando um problema de sincronicidade com a disponibilidade de alimentos (Anthes, 2004).

Em geral, é esperado que as mudanças climáticas sejam um perigo maior para espécies migratórias de longas distâncias, do que para espécies residentes, ou migratórias de curtas distâncias (Both *et al*., 2006). Além do desencontro entre o tempo de sua chegada, e do avanço na disponibilidade de comida, a duração desta disponibilidade deve diminuir, já que plantas e insetos crescem mais rápido em temperaturas mais altas (Both *et al*., 2006).

Adicionalmente, espécies residentes e migratórias de curtas distâncias se adaptam mais facilmente às condições, e iniciam seus processos reprodutivos mais cedo. Assim, migrantes de longas distâncias encontram menos locais disponíveis para fazer seus ninhos, e a pressão da competição tende a aumentar (Lemoine *et al*., 2007).

Além das diferenças climáticas, a plasticidade para aves migratórias de longa distância também é afetada por causa da troca de penas, que em muitas espécies com esse comportamento, ocorre no inverno (Ginn e Melville, 1983). Segundo Moller *et al*. (2011), em seu estudo sobre andorinhas, os animais chegam em seus territórios de inverno cedo, porém sua troca de penas não se inicia mais cedo, uma vez que é determinada pela temperatura, assim não conseguindo sair mais cedo em sua migração de primavera. Então, algumas espécies podem estar impedidas de avançar suas migrações devido a processos biológicos, além de mudanças no clima em níveis diferentes.

As chuvas também podem representar limitações na quantidade que uma espécie pode adiantar sua migração, com espécies acostumadas ao acúmulo de gordura pré-migratório. Essas espécies podem criar uma dependência no pico de comida trazido pelas primeiras chuvas da temporada, o que pode tornar difícil que elas adaptem sua saída por terem que esperar a chegada das chuvas (Bell, 2007).

Outros fatores também podem influenciar as respostas de animais migratórios às mudanças no clima. Segundo Végvári (2010), níveis de alteração fonológica variam muito dependendo de habitat e dieta, e a flexibilidade que uma espécie tolera em sua dieta pode ser um fator essencial na resposta à variação do clima.

Adicionalmente, aves que fazem ninhos em cavidades migram mais cedo do que espécies com estratégias de locais de ninho mais disponíveis, presumidamente como resultado da competição por lugares ideais para a construção de ninhos (Rubolini *et al*., 2005). Ainda para Rubolini, a intensidade da competição para acasalamento também pode influenciar a chegada mais adiantada na primavera, com espécies que apresentam maior dimorfismo em tamanho chegando mais cedo.

Segundo Bitterlin e Van Buskirk (2014), também é o caso para espécies em que as condições mais quentes na primavera afetam mais a disponibilidade de alimentos, como as aves que se alimentam de sementes, frutas e insetos, e diferente das que comem peixes e outros animais, que não encontram a mesma pressão.

Ainda existem alterações que podem ocorrer no caminho, que também podem dificultar o ajuste das migrações. Por exemplo, áreas com diferentes situações de mudanças no clima durante as rotas migratórias, podem apresentar barreiras climáticas (Hüppop e Winkel, 2006), que atrapalham a adaptação dos animais. Outro fator importante, são as mudanças em condições que impulsionam as migrações, como correntes marinhas e ventos. Segundo La Sorte *et al*. (2018), os ventos de oeste estão projetados para aumentar de força durante a primavera, e diminuir de força durante o outono. Isso sugere que neste corredor migratório, espécies devem ser impulsionadas durante suas migrações de primavera, mas devem perder eficiência em suas migrações de outono, gastando mais energia.

Diante de todas as dificuldades, muitas espécies não conseguem se adaptar às mudanças temporais na abundância de alimentos, e por isso acabam sofrendo um grande risco.

Segundo estudos de Moller *et al*. (2008), espécies que não conseguiram avançar suas migrações de primavera, apresentaram declínio populacional, enquanto as que conseguiram adaptar sua fenologia, se mantiveram estáveis ou aumentaram.

Outro estudo que comparou nove populações de aves na Holanda, identificou um declínio de aproximadamente 90% nas últimas duas décadas, nas populações de locais onde o pico de alimento avançou, e as espécies não conseguiram se adaptar (Both *et al*., 2006). Segundo os autores, algumas espécies não conseguem lidar com as mudanças, pois suas respostas diferem das respostas de organismos mais abaixo na cadeia alimentar, afetando a cronologia de reprodução e de abundância de alimento.

Para estudos investigando a dinâmica de populações, as tendências em populações migratórias são mais proximamente relacionadas a mudanças no clima em seus territórios reprodutivos, enquanto nos territórios de inverno, a cobertura vegetal é mais importante (Howard *et al*., 2020).

Mesmo conseguindo avançar suas migrações, algumas espécies ainda encontram outros problemas. Para um ganso migratório, Lameris *et al*. (2018) mostra que, apesar de conseguir acelerar sua migração parando menos tempo no meio do caminho para recuperar energia, o animal não consegue adiantar sua reprodução, uma vez que quando chega nesses territórios, precisa de tempo para repor a energia gasta na viagem.

O desencontro da chegada com os recursos, também pode ocorrer de outra forma. Muitas aves aceleram suas migrações quando sentem temperaturas mais quentes, sendo assim, ao encontrar maiores temperaturas durante suas rotas migratórias, algumas espécies irão acelerar, e ao chegar muito mais cedo em seus territórios de reprodução, as circunstâncias podem não ter mudado ainda (Both e Marvelde, 2007).

Quando a espécie faz paradas para abastecimento, mudanças no pico de abundância de alimentos em locais historicamente usados com essa finalidade podem resultar nos animais abandonando estes locais em suas próximas viagens. Quando a migração depende da qualidade de paradas com essa finalidade, por exemplo em migrações que ocorrem por muito tempo sobre um oceano, essas perturbações podem ser críticas na migração dessas espécies (Hedenström *et al*., 2007).

Caso a pressão para migrar mais cedo seja muito grande, algumas espécies podem responder mudando sua distribuição em seus territórios de inverno, caso encontre situações favoráveis como relatou Visser *et al*. (2009), se as condições no inverno melhorarem, muitas espécies podem alterar suas estratégias migratórias,

ficando mais perto de seus territórios de reprodução. Essas mudanças irão protegê-las dos custos da migração, em termos de tempo, energia e mortalidade, possibilitando também o adiantamento de sua migração de primavera e a possibilidade de melhor seleção nos territórios de reprodução.

Na maioria das populações de espécies migratórias, uma pequena parcela de indivíduos demonstra atividade migratória muito baixa ou nula. Se esses indivíduos obtiverem mais sucesso devido a invernos mais amenos, mais irão se reproduzir, e sua população irá aumentar, desta maneira resultando em uma espécie migratória se transformando em uma não migratória (Schaefer *et al*., 2007).

Algumas mudanças muito rápidas no ambiente podem tornar difícil a adaptação de algumas espécies com menos plasticidade, nesses casos, indivíduos podem responder se dispersando em direção aos polos, onde encontram ambientes com condições que correspondem melhor às suas adaptações (Burger *et al*., 2013).

Um sinal disso, comentado por Fox *et al*. (2006) na Grã Bretanha, é o aparecimento de 89 novas espécies de mariposa na região durante o último século, indicando uma alteração em direção ao polo norte nas distribuições destas espécies.

Na América do Sul, resultados apresentados por Da Silveira *et al*. (2021) sugerem que espécies podem alterar seus territórios de reprodução e de inverno para áreas mais elevadas, em adição a mudanças de latitude e longitude.

Em ambientes marinhos, as mudanças de distribuição também são frequentes em espécies mais móveis. Em frente às mudanças no clima, espécies podem se mover em direção aos polos, onde as temperaturas ou condições de alimento podem ser mais favoráveis (Lezama-Ochoa *et al*., 2024).

Segundo Lezama-Ochoa *et al*. (2024), alterações de distribuição são uma das respostas mais reportadas diante das mudanças climáticas em ambientes marinhos, e já foram observadas em espécies marinhas em todas as regiões. Algumas espécies apresentam tolerância térmica estreita e necessidades específicas de habitat, e essas devem perder parte de seu habitat, apresentando menores distribuições.

As interações dessas espécies também são de extrema importância para a manutenção saudável dos ecossistemas. Os desencontros na fenologia têm impactado as interações entre predador e presa, em muitas instâncias populações de predadores demonstram declínio (Both *et al*., 2006). Alterações de distribuição apresentam este mesmo impacto, com espécies indo em direção aos polos,

predadores que dependem delas devem sofrer sérios impactos (Lezama-Ochoa *et al*., 2024). Alterações de presas e predadores podem ocorrer em diferentes níveis e direções, impactando predadores especializados, e beneficiando os mais generalistas, como é o caso de muitas espécies invasoras (Hazen *et al*., 2013).

Outra interação que deve ser impactada são espécies de aves parasitas de ninho, que necessitam dos ninhos de outras espécies para sobreviver. Estes animais podem não conseguir rastrear as mudanças de seus hospedeiros devido a menores taxas de microevolução, ou por restrições em sua plasticidade fenotípica (Saino *et al*., 2009).

Alguns casos podem não parecer tão impactantes, em que espécies conseguem adaptar seus comportamentos alterando sua distribuição, porém nesses casos, espécies migratórias podem impactar as residentes, representando uma maior competição por recursos (Sparks *et al*., 2007), ou degradando o habitat não preparado para lidar com sua presença (Campeau *et al*., 2019).

A conservação de espécies migratórias é bastante desafiadora, em parte porque elas utilizam grandes partes de suas áreas por pouco tempo, e alguns locais podem ser muito mais importantes do que outros (Kuemmerle *et al*., 2014). Adicionalmente, espécies viajando através de fronteiras podem ser expostas a diferentes regulamentos e riscos com implicações econômicas e geopolíticas (Melbourne-Thomas *et al*., 2021).

Por esses motivos, a conservação de espécies migratórias demanda ações em conjunto, com diferentes estados se alinhando para protegê-las dos sérios riscos que correm no cenário atual. Caso medidas não sejam tomadas, os impactos serão significativos e terão efeito em todos os níveis tróficos e ecossistemas.

2.3 EXEMPLOS DE ESPÉCIES MIGRATÓRIAS IMPACTADAS POR MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Com o objetivo de expor de maneira mais clara os movimentos migratórios e suas interações com o clima, nesta seção, serão apresentados exemplos de animais migratórios, cujos comportamentos exemplificam a complexa relação entre organismos, ambiente e condições climáticas. Na figura 1, encontram-se imagens dos animais citados nesta seção.

FIGURA 1 – EXEMPLOS DE ANIMAIS MIGRATÓRIOS

FONTE: Adaptado de Flickr (2025).

De acordo com a figura acima, segue a nomenclatura de cada animal de acordo com a figura e letra: (a) Papa-moscas-preto; (b) Andorinha-do-ártico; (c) Caribou; (d) Hiena; (e) Aphrissa statira; (f) Pulgões; (g) Arenque-do-atlântico; (h) Salmão-do-atlântico; (i) Tartaruga-cabeçuda.

2.3.1 Papa-moscas-preto cruzando o Saara

O papa-moscas-preto é uma ave passeriforme, da família muscicapidae. Todos os anos, indivíduos dessa espécie realizam uma longa migração, iniciando ao sul do deserto do Saara, onde passam o inverno, e terminando na Europa, onde têm sua temporada de reprodução.

Tendo sua temporada de reprodução na região norte da Europa, e de não-reprodução ao sul do Saara, essa espécie se encontra durante todo o ano em

regiões sensíveis a alterações climáticas diante do cenário atual, e por isso tem alterado seu comportamento migratório de diversas formas.

Devido às temperaturas mais quentes encontradas durante suas rotas migratórias, o papa-moscas-preto acelera sua migração e com isso tem chegado cada vez mais cedo aos seus destinos (Ahola *et al*., 2004, Hüppop e Winkel., 2006, Gienapp *et al*., 2007), porém, ainda assim a espécie encontra dificuldades para ajustar sua migração ao pico de abundância de alimentos, em decorrência da fenologia dos insetos na Europa ter avançado ainda mais do que a da ave (Cotton, 2003), que pode estar ocorrendo em decorrência dos animais não terem avançado seu tempo de migração na volta para seus territórios de inverno, causando problemas no ciclo migratório (Both e Visser, 2001).

Um estudo do autor (Both *et al*., 2006), mostra que o desencontro de datas entre a chegada do papa-moscas-preto em seu local de reprodução e o pico de abundância de alimentos nestes locais, tem consequências preocupantes para a espécie, levando ao declínio da população do animal, e que maiores reduções de população são esperadas caso o pico de abundância de comida adiante ainda mais, como é esperado com o constante aumento de temperatura.

A andorinha-do-ártico é uma ave marinha conhecida por realizar a migração mais longa de todas as espécies animais. Essa pequena ave viaja anualmente entre os pólos Norte e Sul, percorrendo uma distância entre 48.000 e 70.000 quilômetros, dependendo da região escolhida pelo indivíduo para a reprodução. Essa longa viagem permite que a ave veja dois verões todos os anos, sendo o animal com maior exposição à luz do dia no mundo (Cramp, 1985).

Durante o verão no polo norte, a andorinha-do-ártico se reproduz em regiões como o norte da Europa, Canadá e Groenlândia, e ao término da temporada reprodutiva, migra ao longo da costa oeste da África ou da costa leste da América do Sul, em direção à Antártica, onde passa outro verão, aproveitando a abundância de recursos trazidos pelas correntes frias (Dingle e Drake, 2007).

2.3.2 Andorinha-do-ártico na mais longa migração do mundo

Estudos realizados sobre a espécie mostram declínio em algumas populações (BirdLife International, 2018), porém o modelo realizado por Morten *et al*. 2023, diz que os impactos sobre a espécie em termos de produção primária líquida,

ventos e gelo, deve ser mínima. Ainda assim, os autores apresentam o risco que o animal corre, uma vez que pequenas alterações podem se acumular, causando maiores danos à espécie, que depende da energia adquirida ao longo de sua rota migratória.

Declínios no sucesso de reprodução da espécie encontrados por Burnham *et al*., (2017), podem estar refletindo alterações no ambiente em sua chegada aos territórios de reprodução, ou pequenas reduções na quantidade de suprimentos que conseguem levar da Antártica, ou ainda uma deterioração nas condições encontradas em suas rotas migratórias (Morten *et al*., 2023).

Além de sua impressionante migração, a andorinha-do-ártico é uma espécie muito importante nos ecossistemas marinhos das altas latitudes, e assim como outros animais que dependem destes locais dramaticamente alterados pelas mudanças climáticas, devem seguir enfrentando condições cada vez mais desafiadoras.

2.3.3 As renas e as mudanças no clima ártico

A Rena ou Caribu, é um mamífero da família dos cervídeos, nativo de regiões árticas e subárticas. Caracterizado por seu porte robusto e por seus longos chifres, o caribu desempenha um papel crucial na região, sendo uma das mais importantes fontes de alimento para predadores como lobos e ursos.

A migração desempenhada pela espécie é impressionante, sendo realizada por centenas de milhares de indivíduos viajando milhares de quilômetros em alguns dos ambientes mais gelados do planeta, ambientes estes, que são possivelmente os mais afetados pelas mudanças climáticas, uma vez que as temperaturas no ártico aumentaram o dobro do aquecimento global médio nos últimos 50 anos (IPCC, 2013). Com isso, datas de congelamento e degelo de rios e lagos nessas regiões têm mudado (Magnusson, 2000).

Para facilitar sua migração, o caribu atravessa grandes corpos d’água congelados (Sharma *et al*., 2009), e as mudanças nas dinâmicas de gelo nesses locais podem ter grandes consequências para este animal. Segundo Sharma *et al*. (2009) e Leblond *et al*. (2016), as renas devem adiantar sua migração de primavera para garantir uma passagem segura pelos corpos d’água, e caso não consigam fazer esse ajuste, podem ser forçadas a contornar estes locais, o que aumentaria a

distância, tempo e energia gasta para chegar em seu destino. Além disso, podem encontrar rios e lagos com gelo fino, o que pode causar o afogamento de muitos indivíduos.

Outra resposta da espécie às mudanças climáticas, pode ser dada na forma de uma alteração na faixa de distribuição das populações, que pode exercer uma mudança mais ao norte, se beneficiando de períodos mais longos sem neve, e com eventos climáticos menos extremos (Sharma *et al*., 2009), porém, a presença de centenas de milhares de animais deste porte em regiões não acostumadas com essa interação, acarreta um declínio na vegetação e na qualidade de forragem (Campeau *et al*., 2019). Isso aponta para o fato de que, mesmo se os animais migratórios forem capazes de se adaptar às alterações no clima, novas interações ocasionadas por isso podem ser prejudiciais, tanto para outras espécies, quanto para os habitats.

2.3.4 A migração do Serengueti e sua influência em predadores nativos

O Serengueti é uma região de alta biodiversidade localizada na Tanzânia, e nela ocorre a migração terrestre mais massiva da Terra, sendo composta por 200.000 zebras, 400.000 gazelas e por mais de um milhão de gnus (Sinclair, 1995). No início da temporada de seca, quando a qualidade da pastagem começa a cair, estes milhões de indivíduos se deslocam para o noroeste, onde ficam até a volta da temporada de chuva.

As hienas que vivem no parque nacional do Serengueti, apesar de não migratórias, dependem da grande migração de herbívoros para garantir seu alimento, principalmente as fêmeas em período de lactação, que precisam de muitas calorias para alimentar os filhotes. Quando a quantidade de presas é baixa no território de um clã, a hierarquia das hienas garante que as fêmeas lactando irão receber mais comida do que membros mais baixos do grupo, porém, quando a quantidade de presas é muito baixa devido à migração, e não há alimento suficiente dentro do território das hienas, mesmo as fêmeas encarregadas de alimentar os filhotes saem em busca de presas, percorrendo até 140 quilômetros para encontrar alimento (Gicquel *et al*., 2022).

As mudanças climáticas podem afetar os regimes de chuva no Serengueti, o que consequentemente irá afetar o tempo de migração de herbívoros na região,

além disso, espécies migratórias podem ter respostas diferentes às alterações (Bracis & Mueller, 2017).

Com as mudanças na cronologia e nas rotas migratórias de suas presas, as hienas podem se deparar com uma situação em que os herbívoros migratórios passam menos tempo dentro de seus territórios, o que pode aumentar o tempo que fêmeas lactando gastam atrás de presas, também aumentando a distância destas viagens em busca de alimento, e assim reduzindo sua presença junto dos filhotes (Gicquel *et al*., 2022).

Isso reforça o conceito de que as alterações causadas em espécies migratórias, também têm o potencial de afetar muitas outras espécies que dependem das interações com elas para sobreviver, e essas interações devem ser levadas em consideração para que seja possível dimensionar, de fato, os impactos causados pelas mudanças climáticas.

2.3.5 As borboletas e o El Niño

Florestas tropicais em todo o mundo estão sofrendo com o aumento de temperaturas e mais prolongados períodos de seca (Malhi & Wright, 2004). Na região neotropical, o El Niño é um grande contribuinte nas temperaturas e chuvas, sendo uma característica de eventos de El Niño, severas e prolongadas secas na região (Lyon, 2004). Como é estimado que secas na região se tornem mais frequentes e duras, torna-se interessante observar as mudanças de comportamento de espécies durante eventos de El Niño, podendo assim ser extrapolados para prever o que deve mudar futuramente com as mudanças climáticas (Coley, 1998).

O voo das borboletas têm amparado evidências sobre as mudanças climáticas (Parmesan, 2006), sendo as mudanças no clima reportadas como responsáveis pelo adiantamento do voo de borboletas em diversos locais no mundo (Srygley *et al*., 2010). Sendo assim, alguns estudos avaliaram as influências do El Niño em espécies de borboleta, como a Aphrissa statira estudada por (Srygley *et al*., 2010) e a Marpesia chiron, estudada por (Srygley *et al*., 2013), ambos conduzidos em migrações na América Central.

Ambos os estudos encontraram alterações na migração das borboletas devido às mudanças climáticas causadas pelo El Niño, sendo maior a migração durante anos mais secos de El Niño, do que anos húmidos de La Niña. Também

encontraram correlação entre as migrações e a temperatura da superfície da água no canal do Panamá, atravessado por ambas as espécies, sendo a maior taxa de migração associada a anomalias encontradas na temperatura do canal durante anos El Niño.

Também foi medida a produção de folhas em uma espécie de planta associada às borboletas estudadas, e ambos os estudos concluíram que em anos mais secos de El Niño, mais folhas foram produzidas, o que influencia as migrações na região, além da produtividade reprodutiva das espécies.

2.3.6 Insetos migratórios e os riscos à produção agrícola

Nas últimas décadas, o aumento das temperaturas em regiões temperadas causou o avanço da fenologia de plantas e insetos no hemisfério norte, além disso está bem documentado que as mudanças no clima têm influenciado a morfologia, alterado a faixa de ocorrência e aumentado a população de insetos na região (Sparks *et al*., 2007).

Segundo Fox *et al*. (2006), em torno de 89 novas espécies de mariposa conseguiram colonizar a Grã-Bretanha na última década, indicando a alteração mais ao norte das faixas de ocorrência de insetos no hemisfério norte. As implicações disso são, principalmente, na saúde, economia agrária, e também na conservação (Sparks *et al*., 2007).

Segundo Sparks *et al*. (2007), novas espécies em uma habitat significam uma maior disputa por recursos com as populações nativas, e quando o assunto são insetos migratórios, há sempre a preocupação da introdução de novas doenças, que além de impactar diretamente humanos, existe o risco de tais doenças afetarem a produtividade agrícola, assim como a simples presença de maiores populações de insetos, serem altamente prejudiciais à atividade agrícola.

No estudo feito por Fish *et al*. (2005), ele cita algo dito por Charles Elton, em 1927, que disse: “Suponhamos agora que um pequeno herbívoro - um rato ou um pulgão - consegue subitamente acelerar a sua taxa de crescimento, quer como população ou como indivíduo. A mudança pode ser causada por um inverno favorável que permitiria à população começar a primavera com um capital de números maior do que o habitual”, a colocação, muito pertinente, é confirmada por estatísticas encontradas por Fish *et al*. (2005), mostrando que há uma forte

correlação entre a temperatura no inverno e a taxa de crescimento de população do pulgão, além de sua fenologia migratória.

Apesar das mudanças encontradas, tanto na fenologia, quanto na quantidade de pulgões com relação à temperatura, Fish *et al*. (2005) apontam que a abundância não apresenta crescimento constante ano a ano. Ao invés disso, as populações flutuam amplamente, indicando a ocorrência de processos regulatórios. Ainda assim, se num determinado ano um pico de abundância de uma espécie de pulgão ocorrer devido às mudanças climáticas, o prejuízo econômico será desastroso (Baker *et al*., 2015).

Tais mecanismos são melhores compreendidos no hemisfério norte, porém o risco de infestação de insetos migratórios na agricultura tem o potencial de ser desastroso em qualquer lugar do mundo, merecendo maiores estudos sobre as alterações em insetos migratórios perante as mudanças climáticas no hemisférios sul.

2.3.7 Impacto na economia e conservação: o problema de peixes migratórios

Impactos econômicos causados por mudanças em espécies migratórias não são exclusivos da agricultura. Outro impacto importante pode ocorrer em alto mar, devido às mudanças nas populações e na distribuição de peixes, essenciais para a atividade econômica de muitos países.

As mudanças climáticas têm alterado a distribuição de muitos peixes nos oceanos, como as populações de arenque (pequeno peixe gorduroso) que habitam os mares da Noruega, que apresentam alterações em seus padrões migratórios desde os anos 50 (Sissener e Bjørndal, 2005).

As alterações de distribuição de peixes têm potencial para ocasionar um sério problema, começando pela jurisdição de países sobre áreas no oceano. No caso do arenque estudado por (Sissener e Bjørndal, 2005), as mudanças de distribuição já os colocaram em águas pertencentes à Noruega, à Rússia, e em águas internacionais.

Além do potencial problema econômico causado por essas alterações, também deve ser levado em consideração a problemática conservação desses animais, considerando que ao cruzar linhas sob jurisdições diferentes, as regras criadas por um país ou outro não se aplicam mais. Assim, seria necessário a

adequação de leis entre países para garantir a conservação de espécies afetadas por este problema, mas isso nem sempre é possível, considerando as marcantes divergências políticas que podem estar presentes entre dois ou mais países.

Dos anos 50 para cá, a pressão sobre populações de peixes têm aumentado significativamente, e a tendência é que essa pressão aumente, com o crescimento populacional humano e a evolução da tecnologia. Desta maneira, populações de peixe que migram entre áreas sob diferentes jurisdições, correm sério risco de serem exploradas de maneira excessiva, caso não haja colaboração entre os diferentes governos, uma vez que estados menos interessados na conservação desses animais podem tentar maximizar seu lucro quando as populações estão sob sua jurisdição, praticamente desfazendo qualquer trabalho de conservação traçado por outros países (Sissener e Bjørndal, 2005).

2.3.8 As migrações entre rio e mar

Um dos tipos de migração animal que mais depende de sinais na temperatura para ocorrer, são as de peixes diádromos. Esses são peixes que migram entre a água doce e salgada na época reprodutiva, sendo anádromos quando crescem no oceano e sobem rios para se reproduzir, ou catádromos quando vivem na água doce e descem para o oceano na época de reprodução.

A temperatura da água é um fator muito importante, que age como um sinal para essas espécies começarem, e determinarem a intensidade de suas migrações (August e Hicks 2007). Sendo assim, as mudanças climáticas podem ser extremamente nocivas a estes animais, que dependem da temperatura no momento mais importante da perpetuação da espécie.

Segundo os resultados encontrados por Peer e Miller (2014), que estuda a migração do robalo-riscado, a temperatura da água na primavera foi o principal fator influenciando a cronologia da migração para as áreas de desova, com temperaturas mais altas desencadeando migrações adiantadas. Segundo os autores, que analisaram peixes capturados por pesca, em anos mais frios, estes peixes iniciaram mais tarde suas migrações, resultando em mais fêmeas carregando ovos sendo capturadas.

Outro estudo demonstrando a influência das alterações de temperatura em peixes diádromos, escrito por (August e Hicks, 2007), sobre a enguia-de-vidro na

Nova Zelândia, concluiu que quando a água se encontra em temperaturas mais baixas do que 12ºC ou mais altas do que 22ºC, a migração é quase completamente suspensa, o que pode reduzir drasticamente o tempo adequado para migração deste animal, além de ter um grande impacto na reprodução da espécie na região.

Outras respostas também podem ocorrer, como é o caso com o salmão Onchorhynchus nerka, que ao enfrentar temperaturas mais altas (18ºC à 19ºC), apresenta um grande estresse cardíaco, que causa a exaustão do peixe, e o aumento da mortalidade. O problema é que tais temperaturas atualmente são encontradas com frequência pela espécie em seus locais de migração, o que deve apenas aumentar no futuro, causando ainda mais complicações para o animal (Anttila *et al*., 2014).

Outro estudo ainda encontram mais evidências do aumento de mortalidade de peixes diádromos, como (Martins *et al*., 2010), que aponta para uma redução alarmante de uma espécie de salmão diante do aumento de temperatura, caso este peixe não se adapte, revertendo sua fenologia migratória ao que era antes das mudanças climáticas.

Com isso, pode-se estabelecer que o risco para as espécies com essa característica migratória é alto, e deve continuar crescendo em paralelo ao aumento da temperatura da água em seus habitats.

2.3.9 Tartarugas-marinhas e as mudanças climáticas

Existem 7 espécies de tartarugas marinhas, e todas elas são migratórias (Robinson *et al*., 2009). Devido a pressão sofrida por elas, causada por diversos fatores, hoje em dia estão todas ameaçadas de extinção, sendo as mudanças climáticas, certamente, um desses fatores.

Segundo Almpanidou *et al*. (2019), temperaturas mais altas afetam todos os processos fisiológicos e biológicos de espécies ectotérmicas, e até mudanças sutis de temperatura podem causar efeitos consideráveis em processos metabólicos de tartarugas marinhas. Por exemplo, temperaturas mais altas podem afetar positivamente o crescimento, maturação e reprodução de tartarugas-cabeçudas, mas reduzir a taxa de sobrevivência pós-nascimento.

Outro fator que pode ser alterado conforme o clima muda, são os padrões migratórios das tartarugas marinhas. Alguns estudos já demonstram uma alteração

em direção aos pólos para alguns indivíduos (McMahon and Hays, 2006), e outros padrões também podem mudar para seguir as condições climáticas, como velocidade de migração e paradas durante a migração em regiões diferentes (Almpanidou *et al*., 2019).

Segundo Petsas *et al*. (2023), tartarugas marinhas são uma espécie ideal para analisar como alterações em correntes marinhas afetam a migração, uma vez que todas as espécies viajam periodicamente por milhares de quilômetros, e as correntes afetam de maneira marcante seus movimentos, influenciando os locais de desova escolhidos, e as trajetórias dos filhotes recém nascidos. Então alterações nas correntes devido a mudanças no clima devem afetar seus movimentos e destinos.

Outro sério problema que as tartarugas marinhas podem enfrentar é a perda de habitat em locais de desova, como encontrado por Fish *et al*. (2005). Segundo os autores, com o aumento dos níveis do mar estimado para o futuro em regiões no Caribe, as tartarugas-de-couro devem perder locais historicamente usados para desova, e o mesmo pode ocorrer com outras espécies ao redor do mundo.

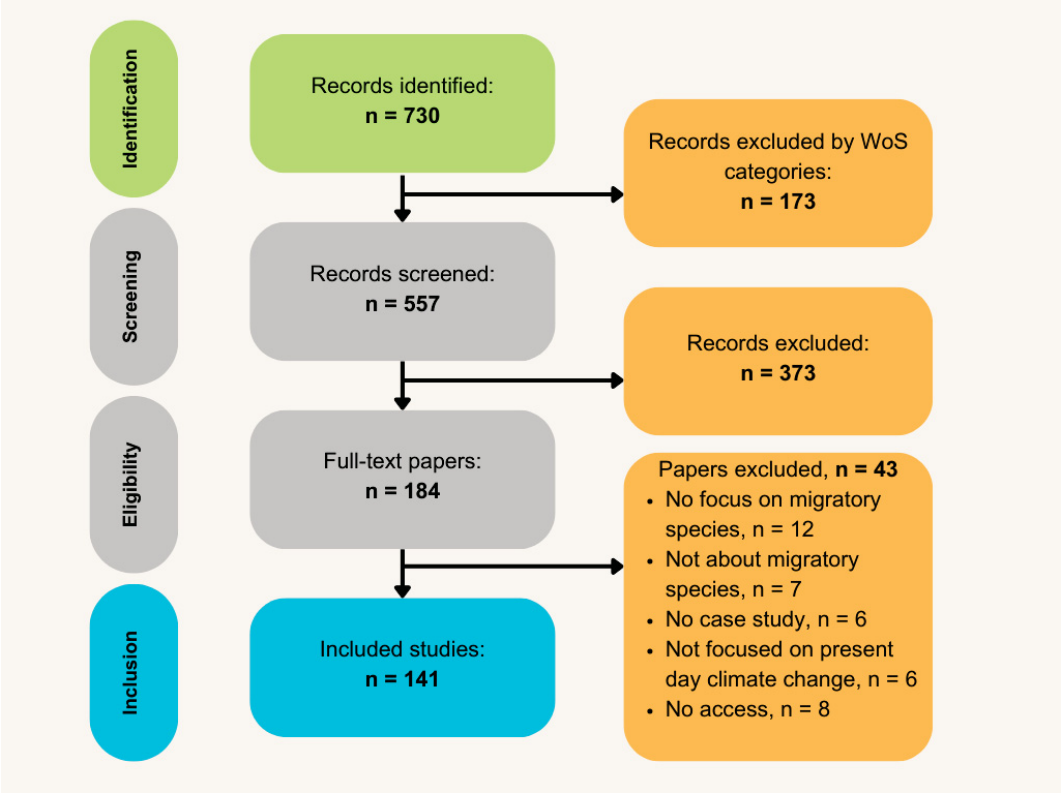
Mais uma consequência que pode ser desencadeada para estes animais, é a taxa de nascimento de indivíduos de um sexo ou de outro. O sexo de muitos répteis, incluindo as tartarugas marinhas, é definido durante o período de incubação, enquanto o embrião se desenvolve, e é altamente dependente da temperatura durante essa fase. Segundo Godley *et al*. (2002), em um estudo conduzido na Ilha de Ascensão, no meio do oceano Atlântico sul, tartarugas-verde apresentaram uma tendência alta de nascimento de fêmeas na ilha, com 75% dos ovos gerando fêmeas. Os autores ainda apontam outros estudos que encontraram resultados semelhantes, todos resultando em mais fêmeas do que machos, devido a temperaturas elevadas durante a incubação dos ovos.

Somando todas essas alterações a outros estressores afetando tartarugas marinhas atualmente, podemos notar o motivo de todas estarem ameaçadas de extinção, e o porquê ações de conservação dessas espécies são tão importantes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi conduzida por meio da avaliação de estudos indexados na base de dados da Web of Science (WOS), publicados até o dia 22 de março de 2024. Os artigos considerados para as triagens foram encontrados por meio do uso da seguinte combinação de palavras na opção título: (climate OR temperature) AND (chang* OR warm*) AND *migrat*. Ressaltando o uso do asterisco (*), que permite que sejam encontradas todas as variações de sufixos e prefixos para migração, mudança e aquecimento. A busca resultou em 730 correspondências, que foram selecionadas seguindo o protocolo "Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses" (PRISMA) (O'Dea *et al.*, 2021), como demonstrado na Figura 2.

FIGURA 2 – PRISMA Eco-Evo protocol.



FONTE: Autoria própria (2024).

A escala espacial foi definida como escala global, com o objetivo de que fosse possível analisar uma quantidade mais expressiva de espécies, indicadores e

resultados, além de possibilitar uma análise sobre o estado da literatura científica acerca do tema, permitindo uma melhor compreensão das tendências e lacunas presentes nos estudos. Os termos da pesquisa foram estabelecidos com o intuito de tornar a revisão mais viável, tendo sido escolhido apenas o campo “Título” para as buscas, por considerar que grande parte das publicações com foco neste tema iriam usá-los em seus títulos, ao mesmo tempo que muitos artigos de outros temas diversos poderiam usar também essas palavras em seus resumos, aumentando muito a quantidade de artigos sem relevância para a análise.

Primeiramente foi feita a identificação de todos os registros, e 173 foram excluídos utilizando a ferramenta de categorias da WOS. Para este estudo, foi estabelecido o uso apenas de artigos científicos que não de revisão, então todos os outros fora da categoria “articles” foram removidos, deixando 557 publicações para as seguintes etapas.

Utilizando os artigos restantes, foram feitas duas triagens com o objetivo de selecionar apenas os artigos pertinentes ao escopo da pesquisa, que já foi explicado em maiores detalhes na seção anterior, mas de forma clara e objetiva se trata especificamente de impactos causados pelas mudanças climáticas atuais, às espécies de animais que têm como característica migrar de acordo com algum sinal temporal ou climático.

Mesmo buscando estreitar os resultados através dos termos buscados, uma quantidade grande de artigos irrelevantes ainda foram encontrados dentre os 557, e foram excluídos da pesquisa na etapa de triagem, que consiste em ler títulos e resumos de todos os registros. Totalizando 373 publicações excluídas, estas falavam principalmente sobre: migrações humanas por motivo de mudanças climáticas, expansão e retração de vegetação, alterações de zonas climáticas ou formações geológicas, entre outros temas não relacionados à pesquisa, resultando num total de 184 artigos para serem lidos por completo durante a etapa de elegibilidade. Foram excluídos mais 40 artigos, sendo: 12 publicações excluídas por falta de foco nas espécies migratórias, muitos deles tratando por exemplo, de doenças tendo espécies migratórias como vetor, por este motivo trazendo poucos dados relevantes; Outras 7 excluídas por utilizarem o termo migração para descrever mudanças de distribuição de espécies sem migrações sazonais; 6 publicações excluídas por não apresentar estudo de caso, logo não exibindo dados relevantes

nesta pesquisa; 6 excluídas por tratar de mudanças climáticas em outras épocas da terra; e 8 sendo excluídas por não ter sido possível acesso aos artigos por completo.

Após as três etapas de exclusão de publicações, 141 artigos restantes foram incluídos, e neles foram buscados os seguintes dados: Ano de publicação; Local de foco do estudo; Local de onde vieram as espécies estudadas; Local onde foi feita a publicação; Grupos de animais estudados; Meios de migração estudados; Distância migrada; Estações do ano estudadas; Estudo cria modelo preditivo ou apenas estuda dados passados; Autores citam o uso das espécies estudadas como bioindicadores; Indiccadores analisados no estudo; Variáveis climáticas analisadas; Indicadores estudados apresentam alterações; Indicadores estudados apresentam correlação às variáveis climáticas.

Primeiramente, foram anotados os anos de publicação, que foram colocados em formato percentual para possibilitar um comparativo com os anos de publicação de publicações sobre mudanças climáticas em geral, também encontrados na base de dados da WOS, através da pesquisa “(climate OR temperature) AND (chang* OR warm*)” no campo título.

Os tópicos seguintes tratam-se, todos, de localizações geográficas acerca dos estudos analisados, primeiramente considerando o hemisfério onde o estudo foi realizado. Nesta parte, os dados coletados foram tratando do hemisfério onde se encontra o ponto focal do estudo, com o intuito de buscar uma tendência de locais estudados, levando em consideração o maior desenvolvimento do norte global. Em seguida, o local de foco do estudo, que foi considerado o país, ou países, no qual o estudo foi conduzido.

Para definir o local de origem das espécies estudadas, com o objetivo de melhor compreender lacunas presentes na compreensão das mudanças de comportamento das espécies migratórias, foi buscado o local de onde as espécies estão vindo para o local estudado, a palavra origem foi empregada com o intuito de tornar mais fácil o entendimento do objetivo, porém é importante ressaltar que a origem de uma espécie migratória pode ser um tanto subjetiva, em virtude da constante mudança de localidade intrínseca ao comportamento deste tipo de animal.

O último dos tópicos ligados à localização dos estudos é mais intuitivo, sendo considerado o local de publicação do artigo o lugar onde se encontra a instituição que o autor principal da publicação é vinculado.

Foi coletada a informação sobre os grupos de animais estudados, permitindo uma análise sobre as tendências quanto aos tipos de animais que mais são estudados, além de um comparativo com o percentual de animais migratórios de cada grupo para buscar as principais lacunas no campo de estudo.

Quanto aos tipos de migração, é importante definir como foram classificados. Existem três meios por onde uma espécie pode migrar: aéreo, aquático e terrestre. É muito importante tomá-los em conta ao exercer uma análise, pois cada um tem uma série de particularidades que irão mudar indicadores a serem medidos, interações a serem levadas em consideração, e resultados obtidos.

Em um estudo desta natureza, é importante separar espécies com migrações de longa distância, de espécies com migrações de curta distância, devido às diferenças marcantes de situações enfrentadas pelos animais diante dos dois tipos de migração. Portanto, durante a leitura dos artigos, foi tomada nota desta informação quando apresentada pelos autores, e, quando a informação não foi apresentada no texto, definiu-se como migrações curtas aquelas com deslocamentos de centenas de quilômetros, e como longas, deslocamentos de milhares de quilômetros, como sugerido por Dingle (2014).

Para a análise da sazonalidade, foram notadas as estações do ano analisadas pelos estudos, quando estes tinham foco em alguma estação, pelo motivo de melhor compreender os resultados dos indicadores com o contexto de qual etapa de sua migração o animal está passando quando a coleta dos dados foi efetuada. Para estudos notando chegadas ou partidas de animais, foi considerada a estação presente na ocorrência deste evento, enquanto para estudos acompanhando animais por períodos mais longos, foram consideradas as estações de maior importância para o estudo, como primavera ou outono para estudos acompanhando movimentos migratórios, verão ou inverno para estudos acompanhando animais em seus habitats de reprodução ou de invernada, além de múltiplas contagens para estudos se estendendo por várias estações do ano.

Também foram separados estudos que coletaram dados passados para apresentar a situação atual de espécies migratórias, de estudos que criam modelos prevendo possíveis cenários futuros para estas espécies, visto que em um caso fica possível analisar o cenário presente, com informações concretas sobre as alterações observadas, enquanto o outro é mais viável para avaliar possíveis impactos, e desta maneira buscar meios de mitigá-los.

Também tomou-se nota de quais publicações comentam sobre o uso de espécies migratórias como bioindicadores para mudanças climáticas, que podem ajudar a evidenciar o foco da comunidade científica.

Para a análise dos indicadores estudados, ficou clara a necessidade de empregar um método de classificação, com o objetivo de tornar mais evidente as tendências, além do que pode ser observado para investigar alterações em características de espécies migratórias. Para isso, foram agrupados os indicadores em seis categorias: temporais, de padrões migratórios, de população, individuais, de vulnerabilidade, e de habitat.

Em indicadores temporais, foram colocados todos aqueles que medem alguma característica na cronologia das migrações, que são, data de chegada ou saída dos animais em alguma localidade característica de suas rotas migratórias, e data de algum evento ligado à reprodução dos seres.

Em indicadores de padrões migratórios, foram agrupados todos aqueles relacionados às rotas migratórias das espécies, sendo consideradas como tal: alterações na distribuição da espécie, tendo em conta que essas mudanças ocorrem devido a alterações nos padrões migratórios; alterações na distância migrada, como o encurtamento de rotas migratórias; e alteração no caminho de migração, que representa um deslocamento na rota padrão utilizada pela espécie.

Foram considerados indicadores populacionais, aqueles que medem números da população, como quantidade de indivíduos no grupo, quantidade de indivíduos nascidos na época de reprodução da espécie e mortalidade dentro de uma comunidade. Para os indicadores individuais, foram agrupados todos os que medem alguma característica em cada indivíduo do grupo, como tamanho, peso, crescimento, fisiologia e genética. Como indicadores de habitat, foram considerados aqueles que medem as condições de um determinado local por onde a espécie estudada passa, sendo estes resumidos a qualidade do alimento e adequação da temperatura, encontrados pelos animais.

Os indicadores considerados de vulnerabilidade, foram apenas dois, porém são distintos o suficiente dos outros para requerer sua própria categoria. Nestes, os autores Culp *et al*. (2017) e Rempel e Hornseth (2017) utilizaram o “Climate Change Vulnerability Index” (CCVI), que combina informações em exposição e sensibilidade para produzir um valor numérico, que é convertido em

uma nota que categoriza animais em extremamente vulnerável, altamente vulnerável, moderadamente vulnerável, menos vulnerável, e evidência insuficiente.

Com o objetivo de compreender a correlação dos resultados encontrados nos artigos às mudanças climáticas, foi indispensável contabilizar quais indicadores climáticos foram analisados pelos autores dos estudos. Foram contabilizados individualmente os indicadores no caso do uso de apenas um ou dois indicadores climáticos como, temperatura, precipitação ou ventos, e no caso de três indicadores climáticos ou mais, ou do uso de um índice como o NAOI (North Atlantic Oscillation Index) ou SOI (Southern Oscillation Index), foram contabilizados como uso de índices climáticos.

Como o propósito do presente estudo é analisar as alterações sofridas por espécies migratórias no cenário de mudanças climáticas, é essencial medir e contabilizar tais alterações, porém, tendo em mente que este trabalho apenas concatena informações de outros diversos estudos, foi decidido por aceitar como alteração, todos aqueles indicadores que os próprios autores dos trabalhos consideraram como alterados, e como correlação nas alterações com as mudanças climáticas, todas que foram apontadas pelos autores como correlacionadas.

Alguns itens levaram a um total de respostas maior do que o número de artigos analisados, isso aconteceu devido a contagem dupla de artigos que apresentaram múltiplos resultados para o mesmo item.

Após a coleta e análise dos dados, foram construídos gráficos para melhorar a apresentação destas informações, além disso, mapas foram criados a partir de modelos climáticos encontrados no site do IPCC. Foram gerados 4 mapas, todos utilizando a projeção SSP3-7.0 a médio prazo (2041-2060). Foram construídos dois mapas de temperatura média e dois mapas de temperatura da superfície da água. Para cada variável, foram construídos dois mapas, sendo um projetando as mudanças entre os meses de março e maio, e o outro entre os meses de setembro e novembro. A escolha da geração de dois mapas ao invés de um com as médias para o ano todo, foi tomada devido a época onde a maior parte das migrações animais ocorrem, primavera e outono. Em seguida, rotas migratórias foram desenhadas nos mapas, baseadas em estudos encontrados pelo autor, e com as rotas de animais usados de exemplo na fundamentação teórica inclusos. Foi escolhido colocar rotas aéreas e zonas de migrações terrestres nos mapas de temperatura média e rotas marinhas nos mapas de temperatura da superfície da

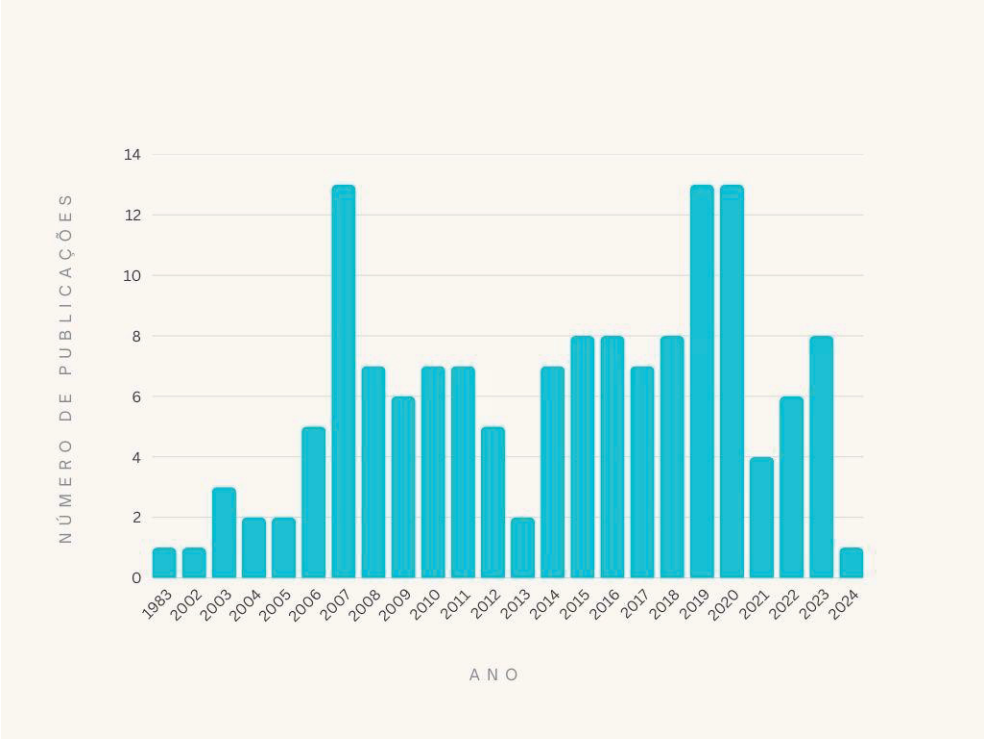
água. Ao final, apoiado nos resultados, algumas conclusões foram elaboradas e reflexões sobre o estado das espécies migratórias, e da biodiversidade em geral.

4 RESULTADOS

4.1 ESTADO DA ARTE: TIPOS DE ESTUDOS E ANIMAIS ESTUDADOS

O foco nesta seção é analisar os dados de como se encontra a atual situação da pesquisa sobre animais migratórios e mudanças climáticas, desde ano e local das publicações, locais e espécies estudadas, tipos de migração, épocas do ano, abordagem dos estudos e menção a bioindicadores. Primeiramente abordando a quantidade de estudos publicados no tópico por ano, em comparação aos mesmos dados para estudos gerais sobre mudanças climáticas.

FIGURA 3 – DISPERSÃO TEMPORAL DE PUBLICAÇÕES.

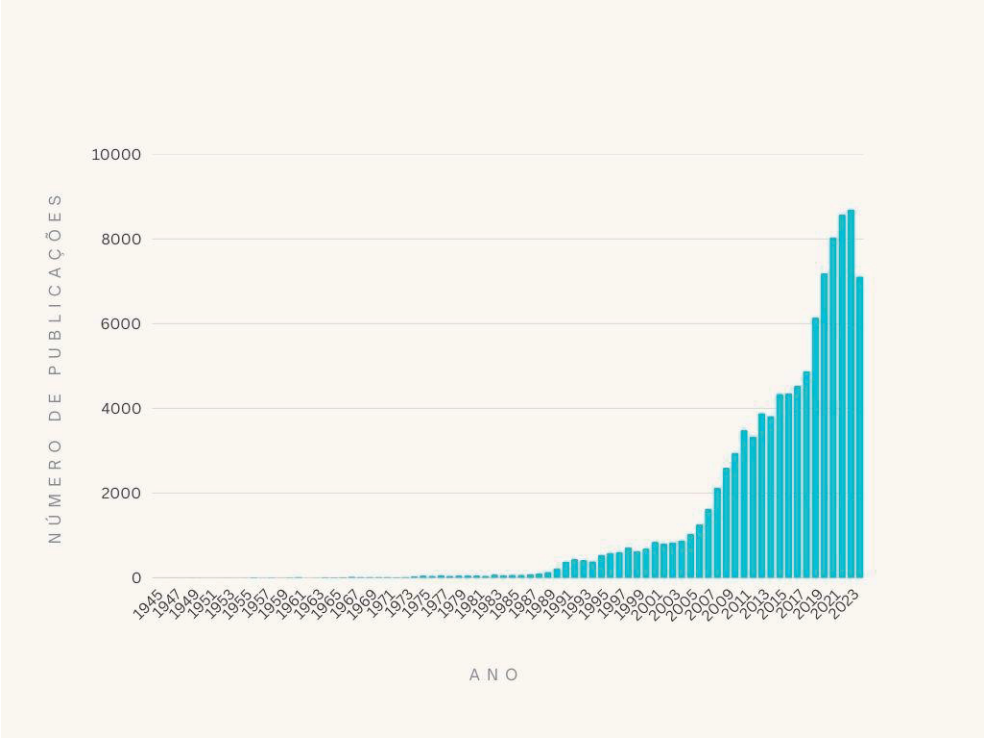


FONTE: Autoria própria (2024).

Conforme a figura 3, as publicações envolvendo espécies migratórias e mudanças climáticas na WOS, só começaram de fato a aparecer no início dos anos 2000, tendo seu primeiro pico em 2007, quando 13 estudos foram publicados. Desde então, todos os anos apresentam estudos publicados sobre o tema, apesar de os

números serem relativamente baixos. O fato da pesquisa ter considerado apenas títulos, pode ter contribuído para isso e limitado o alcance de publicações.

FIGURA 4 – DISPERSÃO TEMPORAL DE PUBLICAÇÕES SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.



FONTE: Autoria própria (2024).

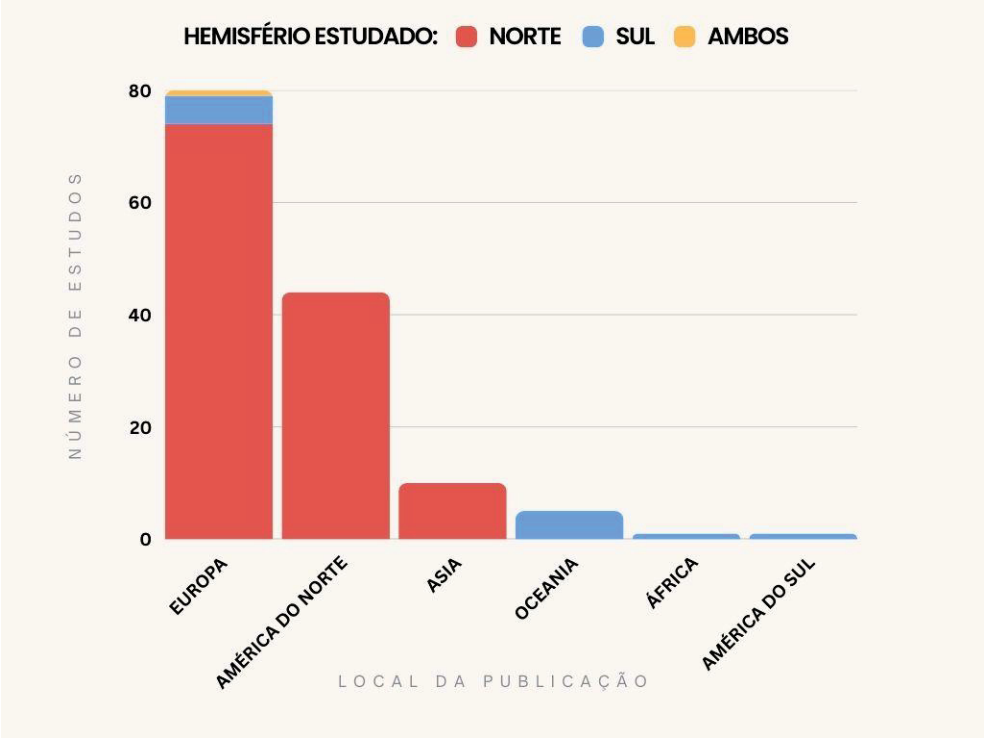
Quando se comparam os números ao percentual de publicações sobre mudanças climáticas ano a ano na WOS, encontramos uma tendência diferente, com crescimento constante de publicações ao longo dos anos, como mostra a figura 4. Enquanto os estudos sobre mudanças climáticas em geral apresentam atenção crescente, os estudos sobre espécies migratórias e mudanças climáticas não encontram essa mesma perspectiva.

Para que no futuro próximo possamos compreender melhor como as espécies migratórias respondem às mudanças climáticas, a tendência na quantidade de estudos deveria apresentar crescimento constante tal como é o caso com publicações sobre mudanças climáticas em geral.

Ao analisar o hemisfério estudado nas publicações analisadas, revelou-se a tendência marcante dos estudos serem realizados no hemisfério norte como mostra a figura 5, sendo 129 dos 141 estudos feitos no norte. Este resultado é consistente com quase qualquer área da ciência. Primeiro por causa da diferença de

desenvolvimento, e consequentemente a quantidade de indivíduos com acesso ao ensino superior.

FIGURA 5 – HEMISFÉRIO DE REALIZAÇÃO DO ESTUDO E CONTINENTE DE PUBLICAÇÃO.



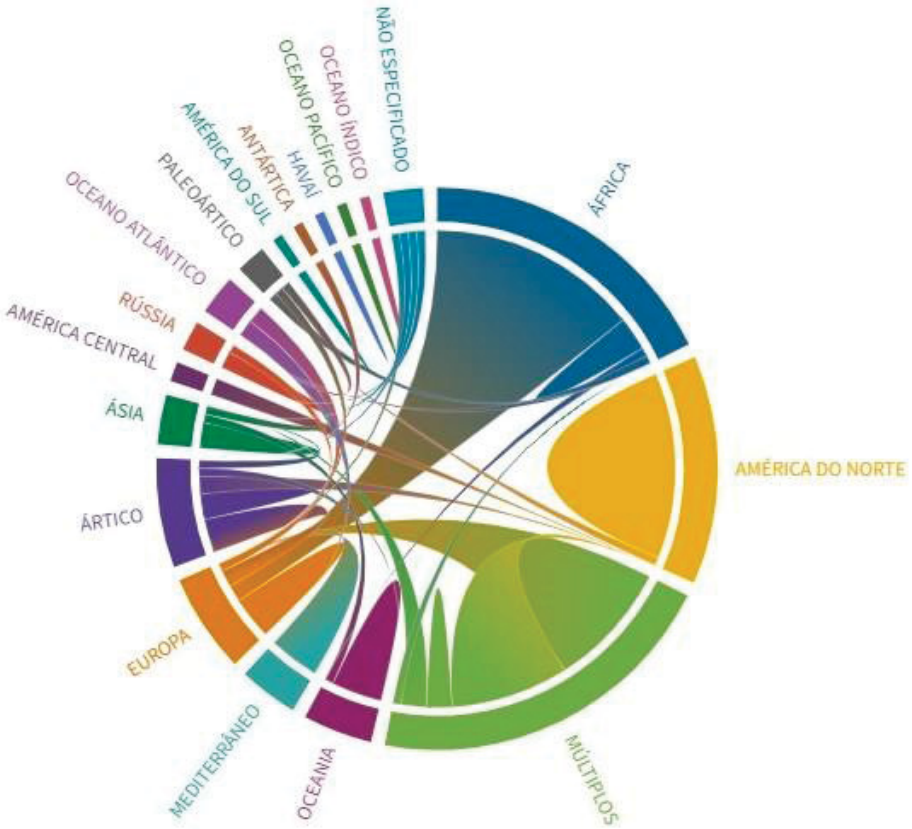
FONTE: Autoria própria (2024).

Para embasar este conhecimento, foi buscado no Banco Mundial o indicador “School enrollment, tertiary (% gross)”, e a disparidade entre os países desenvolvidos e não desenvolvidos é clara. Em países de renda alta, aproximadamente 80% da população tem acesso ao ensino superior, enquanto em países de renda média por volta de 40% têm essa oportunidade, e, em países de baixa renda, menos de 10% da população tem a possibilidade de estudar em uma universidade.

Outro indicador buscado no Banco Mundial, foi o de “Research and development expenditure (% of GDP)”, que mostra que países de renda baixa e média gastam aproximadamente metade do que os países de alta renda, proporcionalmente ao seu PIB, e considerando que o PIB de países de renda alta, geralmente é muito superior aos de rendas menores, fica claro o motivo para mais de 90% dos estudos serem feitos no hemisfério norte.

A mesma tendência pode ser observada na análise dos continentes onde os estudos foram publicados. Continentes com maior índice de desenvolvimento, como Europa e América do Norte foram predominantes, o primeiro apresentando 80 publicações, e o segundo 44. Em seguida, Ásia e Oceania, publicaram 10 e 5 estudos, respectivamente, e África e América do Sul apenas 1 estudo cada.

FIGURA 6 – LOCAL DE FOCO DO ESTUDO E DE ORIGEM DAS ESPÉCIES.



FONTE: Autoria própria (2024).

Os locais mais escolhidos como ponto focal das pesquisas foram a Europa, com 61 estudos, e a América do Norte, com 42, o que pode ser atribuído aos mesmos indicadores apontados para a figura 5, sendo os dois continentes mais desenvolvidos do mundo, e onde há o maior investimento em pesquisa (Banco Mundial, 2023). Em seguida, estudos na Ásia, África, Oceania e Ártico, que podem ser explicados divididos em dois grupos. Ásia e Oceania têm a contribuição de estudos majoritariamente de um país da região, China e Austrália, respectivamente. Já a África e Ártico, apresentam uma situação diferente, tendo a maioria dos seus estudos realizados por pesquisadores europeus.

O caso da África é interessante, pois como fica evidenciado na figura 5, apenas uma publicação foi feita por uma instituição no continente, enquanto 8 estudos foram realizados com foco em algum local na África, mas foram publicados na Europa. Apesar da grande diferença, ainda poucos estudos focam o continente africano, considerando que das espécies estudadas, 34 migraram da África para os locais onde foram estudadas, na Europa, e ainda mais considerando os estudos que analisaram múltiplas espécies vindas de diversas regiões. Analisando esses dados, fica clara a falta de pesquisas que estudam o que acontece com as espécies em seus territórios de inverno, como é a maior parte dos casos para migrantes que viajam entre Europa e África.

A América do Norte permaneceu constante nos gráficos, mostrando a tendência no continente de estudar espécies locais. Além disso, deve ser levado em consideração que, devido ao continente americano ser muito mais isolado do que o restante dos continentes do mundo, menos espécies apresentam migrações intercontinentais, como é o caso entre Europa e África. Ainda assim, uma grande quantidade de espécies viaja entre as Américas, mas não foram tão estudadas quanto as que migram dentro da América do Norte, ou entre o continente e o ártico.

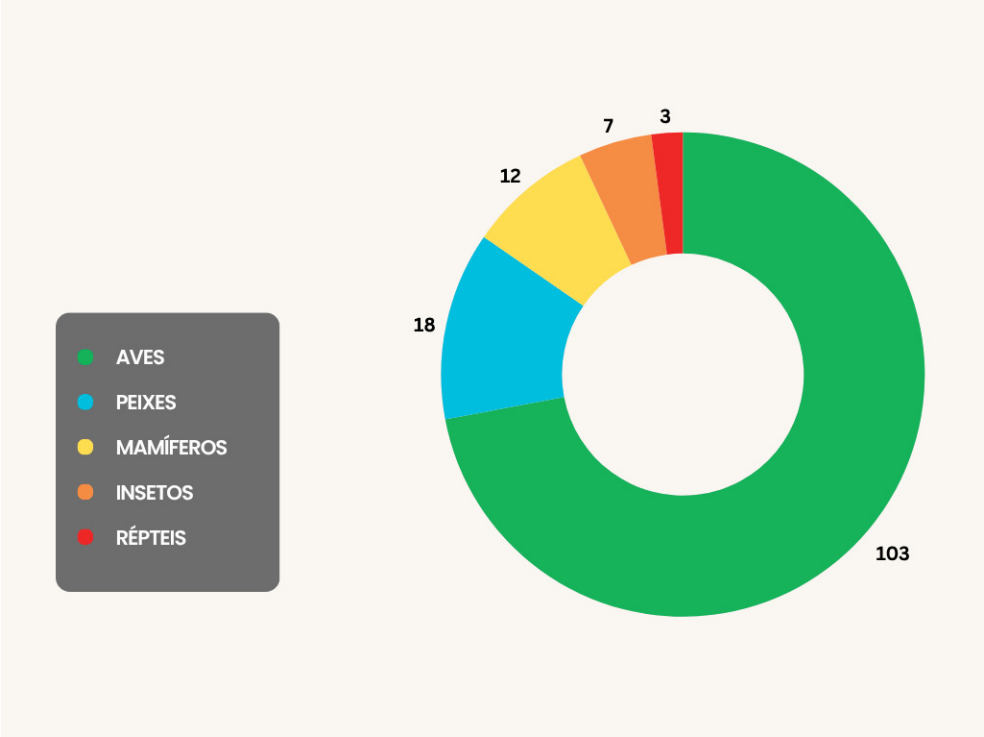
Ásia e Oceania novamente mantiveram números próximos aos de outros gráficos, e a América do Sul apresentou apenas um estudo publicado, com foco de estudo no próprio continente, e sobre espécies que migram dentro do próprio continente, muitas espécies tiveram como origem locais isolados no oceano, e foram estudadas perto da costa.

No mais, alguns oceanos são o local de foco de alguns estudos, principalmente sobre peixes, o mais notável sendo o Ártico, local de grande importância para estudos desta natureza, considerando que muitas espécies nos polos adotam estratégias migratórias para sobreviver aos invernos rigorosos, usando a região durante o verão como local de reprodução, quando seus recursos estão em sua mais alta disponibilidade, e seguindo para o sul quando essa disponibilidade é reduzida com a mudança de estação, e o clima volta a ser hostil. O mesmo ocorre na Antártica, porém apenas um estudo teve como foco espécies desta origem, ressaltando a falta de estudos com foco no hemisfério sul. A Antártica, tal como o Ártico, é um local de extrema preocupação quando o assunto são mudanças climáticas, e necessita com urgência mais estudos sobre o tema, para que possam ser compreendidas de fato, a situação das espécies no continente.

As Américas do Sul e Central, apresentam poucas publicações com foco de estudo. Isso pode ser atribuído à falta de investimento em pesquisa, ao mais baixo índice de acesso ao ensino superior da população, ou até mesmo à barreira linguística, considerando que as publicações encontradas são todas em inglês. Os dados apresentados reforçam a necessidade de mais estudos serem realizados nestes continentes, que possuem grande biodiversidade, mas pouco investimento, resultando em enormes lacunas no conhecimento, que podem ser vitais para a compreensão de como as mudanças no clima afetam espécies migratórias e suas interações.

Lacunas importantes também foram encontradas quando analisando os grupos de animais estudados, como mostra a figura 7.

FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS ESTUDADOS.



FONTE: Autoria própria (2024).

As aves foram o grupo mais representado, com 103 publicações tratando de espécies de aves, 71% do total de publicações. Apesar de serem o grupo com o maior número de espécies migratórias conhecidas, 1500 segundo Robinson *et al*. (2009), ainda assim percentualmente foram sobre-representadas.

A quantidade de aves estudadas se mostra ainda mais discrepante quando comparadas ao número de espécies migratórias de peixes e insetos. O primeiro grupo, que apresenta 874 espécies migratórias conhecidas (Robinson *et al*., 2009), foi foco de apenas 18 publicações encontradas neste estudo, enquanto a segunda, que apresenta uma quantidade não conhecida de espécies migratórias, porém notoriamente muito numerosa, foi estudada em apenas 7 das publicações.

Essa diferença entre grupos estudados ressalta a grande atenção dada às aves migratórias, que muitas vezes são os animais que vêm à mente quando se fala de espécies migratórias, porém, o grupo dos peixes e insetos são de extrema importância para a manutenção dos ecossistemas, além de serem de grande relevância para atividades econômicas, os peixes sendo parte vital na alimentação humana, e os insetos potencialmente sendo um grande causador de impactos para a agricultura.

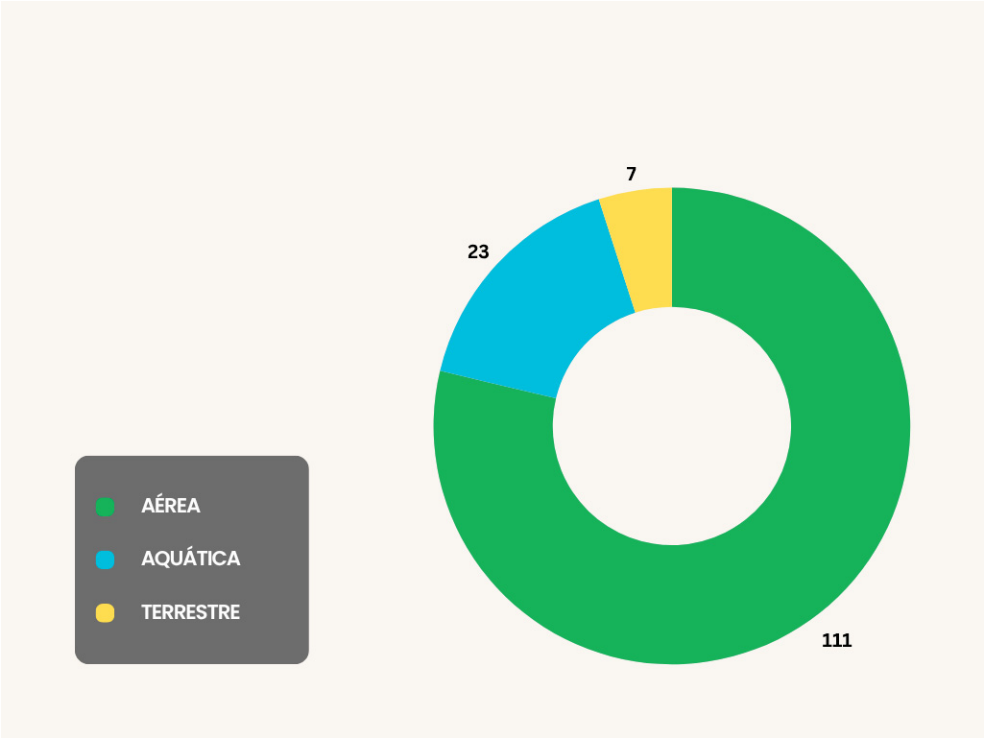
Os mamíferos foram o terceiro grupo mais estudado, com 12 das publicações tratando deste grupo, e dentro deste dado se encontra outra lacuna relevante. Das 186 espécies de mamíferos migratórios, 113 são espécies de morcegos (Robinson *et al*., 2009), e dos estudos analisados, apenas um tratava destes animais, enquanto os outros 11 tiveram foco em grandes mamíferos, como renas, gnus e baleias. Enquanto este número ainda é baixo, considerando a importância que os grandes mamíferos têm em seus ecossistemas, a sub-representação dos morcegos não pode ser ignorada. Morcegos são animais extremamente sensíveis a mudanças climáticas, e o conhecimento sobre como eles reagem a tais mudanças pode ser uma ferramenta importante na compreensão geral do assunto.

Os répteis também foram pouco representados, apesar de não apresentarem muitas espécies com comportamento migratório, apenas 7 (Robinson *et al*., 2009). Ainda assim, somente 3 estudos foram encontrados nesta pesquisa com foco no grupo, mesmo com as tartarugas marinhas sendo amplamente consideradas espécies bandeira em ações de conservação.

Além desses, dois grupos que também apresentam espécies migratórias não apresentaram estudos em absoluto, os anfíbios e crustáceos, talvez por não apresentar espécies que migram longas distâncias, justamente por isso, possivelmente representam bioindicadores locais valiosos, sendo uma lacuna relevante para este tema.

Novamente é preciso reforçar que esta revisão buscou apenas a base de dados da WOS, e apenas no campo de títulos, porém, ainda assim a falta de estudos sobre crustáceos e anfíbios, e a baixa quantidade de estudos sobre qualquer grupo além das aves é preocupante, e aponta para uma lacuna muito significativa na compreensão do fenômeno migratório no cenário atual e futuro.

FIGURA 8 – QUANTIDADE DE ESTUDOS POR MEIO DE MIGRAÇÃO.



FONTE: Autoria própria (2024).

As migrações aéreas foram foco de quase 80% das publicações, considerando a desproporcional quantidade de estudos sobre aves encontrados, além disso, todos os insetos estudados apresentam migrações aéreas, e também o único estudo sobre morcegos entra nessa classificação.

As migrações aquáticas foram representadas em 23 estudos, cobrindo peixes marinhos, peixes diádromos, tartarugas e mamíferos marinhos, e as migrações terrestres foram estudadas em apenas 7 publicações, todas sobre mamíferos.

A baixa representação de estudos sobre espécies migratórias aquáticas e terrestres expõe a falta de conhecimento sobre como as mudanças climáticas afetam estes meios, principalmente sobre como mudanças de distribuição podem

afetar comunidades e que tipos de barreiras ecológicas podem vir a restringir essas movimentações, mais limitadas do que as aéreas.

Foi observada uma tendência de foco em estudos de espécies com migrações de longas distâncias, com uma atenção consideravelmente menor voltada para as espécies de migrações curtas, como mostrado na figura 9.

FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DOS ESTUDOS CONSIDERANDO DISTÂNCIA DA MIGRAÇÃO.

FONTE: Autoria própria (2024).

Em 68 das publicações, as espécies estudadas percorrem, exclusivamente, distâncias longas durante suas migrações, e de fato tais espécies são mais afetadas por mudanças no clima, considerando que geralmente atravessam ambientes extremamente diferentes, e dependem de um certo nível de qualidade nas condições desses ambientes para sobreviver a viagem (Both *et al*., 2006).

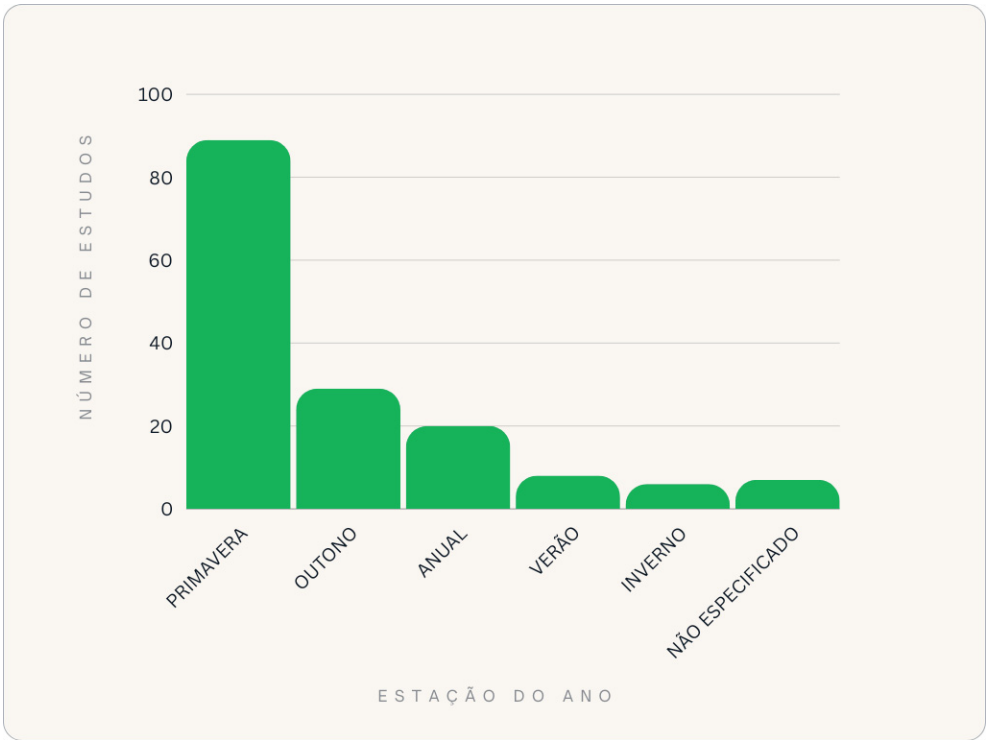
Estudos que tratam apenas de espécies com padrões migratórios de curta distância foram os menos frequentes, com 22 publicações. Dado que não surpreende, considerando que migrantes de curta distância já estão mais habituados às alterações climáticas e fenotípicas, tendo maior facilidade de se adaptar, sendo assim menos vulneráveis às mudanças (Lemoine *et al*., 2007).

Além disso, 23 publicações estudaram ambos os comportamentos migratórios (longo e curto), seja de diferentes espécies ou da mesma espécie com comportamentos distintos, enquanto 29 estudos não especificaram essa informação.

Também é relevante pontuar que a ênfase dos estudos nas espécies de migrações longas resulta em uma lacuna no estudo de espécies com padrões migratórios de curta distância, o que pode ter contribuído para nenhum estudo ter sido feito sobre os grupos de crustáceos e anfíbios, que apresentam apenas migrações curtas.

Outro dado de grande importância no tema de migrações é a época do ano estudada, considerando que os sinais provocados pelas mudanças de estação são fundamentais para as espécies migratórias iniciarem suas jornadas. Para determinar quais épocas do ano foram mais representadas, e quais necessitam maior atenção, estações foram atribuídas às publicações considerando quando os dados foram colhidos. Estudos considerando a chegada ou a saída dos animais, foram classificados em primavera ou outono, assim como estudos que acompanharam algum movimento migratório, e foram atribuídos verão ou inverno a estudos que analisaram dados sobre após os animais chegaram em seus destinos finais. Os resultados são os mostrados na figura 10.

FIGURA 10 – DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES DO ANO ESTUDADAS.



FONTE: Autoria própria (2024).

Primavera e outono podem ser vistos como complementares quando o assunto é migrações, pois em uma os animais estão, em geral, indo para seus sítios de reprodução, e na outra estão voltando para seus territórios de inverno, logo, era esperado que ambos estivessem próximos em representação, porém este não foi o caso. A primavera foi a estação do ano em que mais estudos foram realizados, sendo tratada em muito mais da metade das publicações, enquanto o outono foi muito menos representado, sendo foco em menos de 20% delas.

Também tiveram pouca atenção o verão e o inverno, ambos estudados em menos de 5% das pesquisas. Era esperado que primavera e outono fossem mais representados, mas a baixa quantidade de estudos sobre os períodos estacionários dos animais deixa uma lacuna bastante relevante, considerando a importância que estes períodos têm para a saúde das populações, um de reprodução e outro de abastecimento.

Além disso, em pouco mais de 10% dos estudos, o comportamento anual dos animais foi analisado. Estes estudos são de grande importância para que possa ser conhecido o panorama geral da situação de uma espécie, e seria interessante que uma quantidade maior de estudos com esta abordagem fossem realizados.

As duas últimas análises a serem tratadas nesta seção são a quantidade de estudos analisando dados passados ou criando modelos futuros, e quantos autores fizeram menção a bioindicadores em suas publicações.

Para o primeiro, seria ideal que a maior parte dos estudos criasse algum tipo de modelo para o futuro, além de analisar dados do passado, mas este não foi o caso. Aproximadamente 70% dos estudos, apenas analisaram dados passados, demonstrando a situação atual das espécies estudadas em seus resultados.

Há um grande valor desta abordagem, a situação atual que se encontra uma espécie é extremamente relevante, porém, com os números já obtidos, modelos projetando as condições futuras que essas espécies devem enfrentar poderiam ter sido criados, e seriam de grande interesse, mesmo que tenham menor precisão.

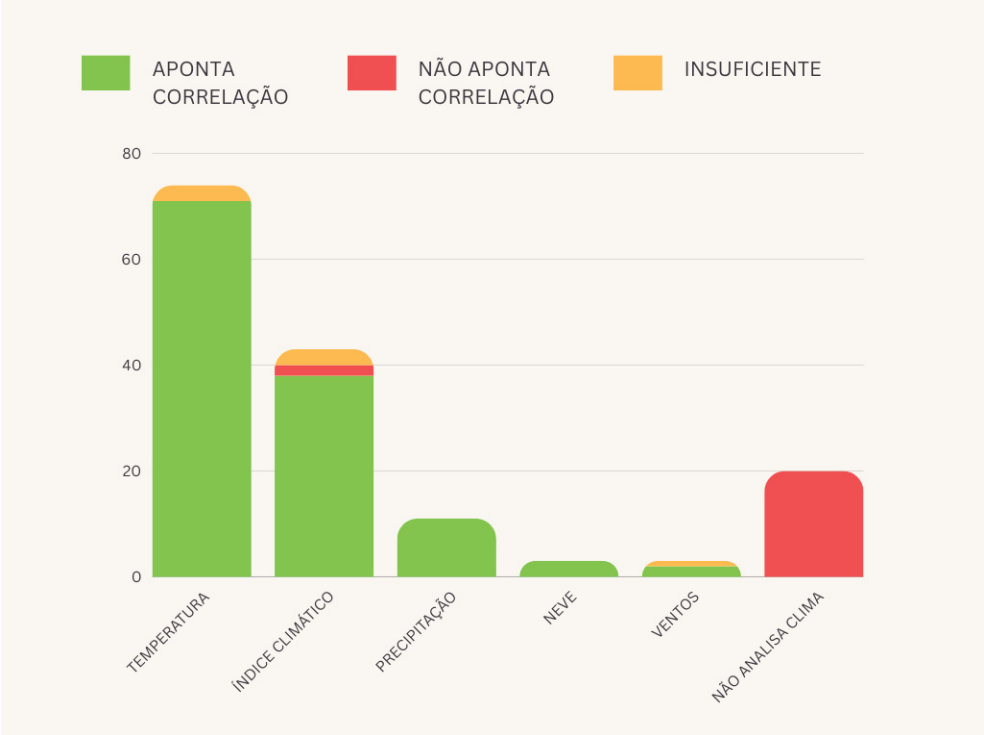
Do restante dos 30% de estudos que criam modelos, foram encontradas diversas abordagens, com projeções de mudanças de rotas e distribuição, variações de populações e qualidade futura de habitats.

Quanto à menção sobre bioindicadores, o número foi bastante baixo, sendo que em apenas 6, das 141 publicações, os autores mencionaram o valor das espécies como bioindicadores. Apesar disso, todos os dados encontrados nestes estudos podem ser lidos como bioindicadores, considerando que expõem as alterações do clima e dos ambientes, em como os animais estudados estão sendo afetados. Ainda assim, seria interessante se os autores dessem mais atenção a esta possibilidade, destacando como espécies migratórias podem ser ótimas ferramentas de bioindicação de mudanças climáticas e saúde dos ecossistemas.

4.2 INDICADORES ANALISADOS

O foco desta seção é analisar os indicadores usados nos estudos, seus resultados, e o que eles representam no contexto geral do tema, possibilitando obter resultados conclusivos sobre os impactos e riscos sofridos por espécies migratórias com as mudanças no clima global.

FIGURA 11 – INDICADORES CLIMÁTICOS ANALISADOS.



FONTE: Autoria própria (2024).

Para iniciar a análise dos indicadores estudados, foram buscados os indicadores climáticos utilizados em cada publicação, e se os autores apontam correlação entre as alterações encontradas nos indicadores biológicos, e as variáveis climáticas estudadas. Alguns estudos não analisaram nenhuma variável climática, então foram analisadas apenas as alterações nos indicadores biológicos estudados, sem o contexto adicional da correlação ao clima.

A figura 11 mostra uma acentuada correlação apontada pelos autores entre as mudanças climáticas e as alterações encontradas nos fenômenos migratórios, reforçando os crescentes impactos sofridos por esses animais tão sensíveis a mudanças.

Na variável mais estudada, a temperatura, a correlação é de quase 95%, com os poucos estudos restantes apontando resultados insuficientes, ou correlação parcial. Pode-se afirmar então que as mudanças de temperatura no ambiente causam alterações em espécies migratórias, e que o estimado crescimento esperado para o futuro pode significar alterações ainda mais marcantes nessas espécies. As respostas dos animais às oscilações na temperatura foram variadas, com algumas mais notáveis sendo aceleração em rotas migratórias para aves, aumento de populações para insetos, maiores dificuldades para realizar suas migrações em rios aumentando a mortalidade nos peixes, e mudanças de distribuição para mamíferos e tartarugas marinhas.

A segunda variável mais estudada, foram índices climáticos, como o North Atlantic Oscillation Index (NAOI) e o Southern Oscillation Index (SOI), o segundo menos utilizado considerando o menor número de estudos no hemisfério sul. Além de índices como esses, também foram agrupados nesta faixa estudos que utilizaram três ou mais variáveis climáticas em suas análises. Aqui, apenas dois estudos não apontaram correlação entre os indicadores biológicos e os índices climáticos, no primeiro, um estudo sobre albatrozes (Somveille *et al*., 2020) no oceano índico, que previu por meio de um modelo que estes animais não devem sofrer grandes alterações de distribuição no futuro, porém os autores apontaram para possíveis impactos em indivíduos maiores da população, que podem ser mais afetados pelos ventos. O segundo estudo (Opdal *et al*., 2011), sobre peixes marinhos, não apontou correlação pois não encontrou alterações no indicador analisado (individual, crescimento), sendo assim, foi assinalado como “não aponta correlação”. Desta maneira, podemos notar que a taxa de correlação entre índices climáticos a

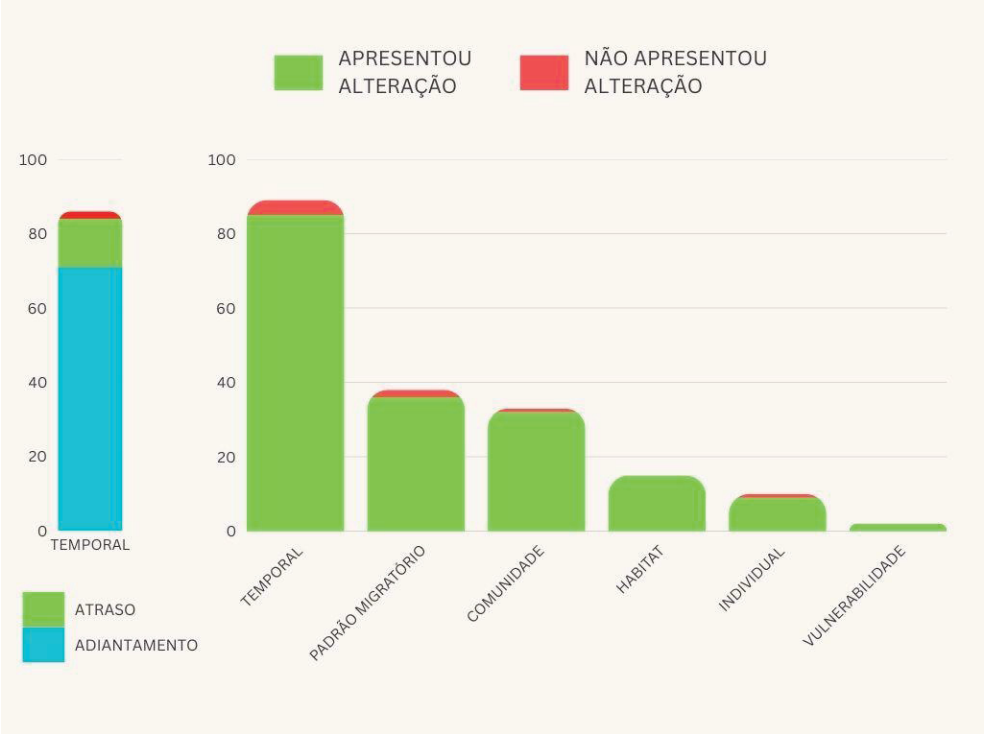
mudanças nos fenômenos migratórios também é alta, em especial para migrantes de longas distâncias, como apontado por diversos autores (Cotton, 2003; Miller-Rushing *et al*., 2008).

Todas as publicações que analisaram precipitação apontaram correlação com os indicadores biológicos. Os índices de precipitação estão fortemente associados à disponibilidade de recursos, logo é esperado que a falta de chuva ou a abundância dela, ocasione alterações no comportamento de animais altamente móveis, como os migratórios.

As variáveis menos estudadas separadamente de algum índice foram, neve e ventos, a primeira apresentou correlação em todos os estudos, enquanto a segundo apresentou correlação em dois, e dados insuficientes em um. Ambas a variáveis podem ser consideradas de elevada importância para espécies migratórias, com os ventos influenciando, principalmente, a migração de aves, desde suas distribuições, que podem ser alteradas caso os ventos laterais em suas rotas sejam mais fortes do que historicamente, deslocando-as mais a leste ou oeste, até a quantidade de energia gasta e velocidade durante a migração, caso os ventos impulsionando ou segurando os animais oscile. Já a neve, tem o potencial de afetar gravemente as espécies que habitam regiões próximas aos polos, alterando a disponibilidade de recursos, caminhos migratórios e habitats. Considerando a importância da presença de gelo sobre corpos d'água para muitas espécies nestes habitats, é uma variável que pode ser melhor explorada em estudos nessas regiões.

Diante disso, fica clara a alta correlação entre as mudanças climáticas e as constantes alterações nos fenômenos migratórios, e caso o aquecimento do planeta não seja controlado, medidas de mitigação de impactos deverão ser tomadas com relação às espécies migratórias.

FIGURA 12 – INDICADORES ANALISADOS NAS PUBLICAÇÕES.



FONTE: Autoria própria (2024).

A figura 12 mostra a frequência de uso dos indicadores analisados para estudar alterações sofridas por espécies migratórias diante do cenário das mudanças climáticas, além da proporção que cada tipo de indicador apresenta de alterações e não alterações. Os indicadores foram separados em seis categorias distintas, de acordo com a maneira que os autores decidiram medir alterações nos animais estudados.

A análise indica que a maior parte dos autores utilizou alguma forma de indicador temporal para examinar as alterações, aproximadamente 50%, principalmente a chegada ou passagem dos animais no local de foco do estudo, além de cronologia de reprodução e troca de penas. Para esse tipo de indicadores, 95% dos autores encontraram alterações em seus estudos, reforçando o conceito apresentado por diversos autores na literatura, de que a fenologia migratória desses animais está sendo alterada conforme o clima muda. O resultado não é necessariamente ruim, considerando o avanço na fenologia de níveis tróficos mais baixos, significando o adiantamento no pico de disponibilidade de alimentos. Os animais que conseguirem se adaptar a essas mudanças, apresentam melhor

perspectiva de sobrevivência no futuro. Porém, ainda é um resultado alarmante, que aponta para as extremas alterações no clima mundial.

Os dados sobre a direção que as alterações temporais estão ocorrendo deixa clara a tentativa de adaptação dos animais ao avanço na fenologia do ambiente, tendo sido encontrado adiantamento em mais de 80% dos casos em que indicadores temporais foram medidos. Isso também se deve ao fato de que a maior parte dos estudos tiveram suas medições realizadas na primavera, como apresentado na figura 10, enquanto nos estudos com foco no outono os resultados foram menos desequilibrados.

Seguindo, os padrões migratórios foram o próximo tipo de indicador mais estudado, presentes em 20% dos estudos, que concatena medições de distribuição, distância e velocidade de migração, além de alterações nas rotas. Aproximadamente 95% dos indicadores deste tipo apresentaram alterações, indicando que estes organismos estão tendo que adaptar suas viagens migratórias frente às mudanças no clima. A principal alteração encontrada pelos autores foi a mudança de distribuição dos animais estudados. Com as mudanças no clima, regiões mais frias tendem a ficar mais moderadas, com isso algumas espécies mudam suas faixas de distribuição em direção aos polos. Tais mudanças podem apresentar graves problemas para espécies residentes nestes locais, aumentando a competição por recursos, e alterando os habitats.

Também foram encontradas diversas alterações nas rotas migratórias, como aumento de velocidade de migração, migrantes passando por locais diferentes no caminho, e alterações nas distâncias migradas, que ocorreram nos dois sentidos (La Sorte *et al*., 2018; Sissener e Bjørndal, 2005; Bell *et al*., 2015). As velocidades de migração podem ser alteradas diante de fatores como correntes marinhas ou de ar, podendo impulsionar ou segurar os movimentos migratórios, porém um resultado comum foi a resposta de alguns animais acelerando suas migrações ao se defrontar com temperaturas mais quentes em suas rotas. Quanto à passagem por locais diferentes, as mudanças no clima podem ocasionar a alteração de rotas migratórias, uma vez que os animais buscarão melhores condições em locais para reabastecimento durante suas viagens, além de mudanças de faixa migratória buscando melhores condições de temperatura. No que diz respeito às distâncias de migração e ao que foi mencionado antes sobre como podem ser mais longas ou mais curtas, muito depende da espécie e do ambiente. Algumas espécies

apresentaram migrações mais curtas, ao encontrarem condições melhores mais próximas aos seus territórios de reprodução, enquanto outras encontraram condições ruins em seus territórios de reprodução, tendo que estender suas viagens para encontrar ambientes mais adequados.

Os indicadores de população também foram bastante utilizados, pouco menos de 18%, medindo as oscilações nas populações das espécies estudadas. Assim como nos anteriores, por volta de 95% dos autores encontraram algum tipo de alteração, sendo o mais comum mudanças no tamanho da população. Essa variação dependeu muito de fatores como grupo animal e distância de migração, mostrando uma correlação positiva na comunidade de insetos com o aumento de temperatura, mas uma tendência na redução das populações de outros grupos com as mudanças. Além disso, a composição de comunidades em alguns locais flutuou em relação à temperatura, com temperaturas de inverno mais altas resultando em menos migratórias, e temperaturas de primavera mais altas resultando em mais migratórias de longa distância do que de curta. É de se esperar que alterações desse tipo ocorram de maneiras diferentes em outros locais no mundo, porém, poucos estudos desta natureza foram encontrados.

O aumento da mortalidade foi bastante comum em estudos sobre peixes diádromos, indicando que o aumento na temperatura da água dos rios pode causar sérios problemas a essas populações. Ademais, nesta categoria de indicadores também foi estudado o sucesso reprodutivo, que muitas vezes foi menor devido ao desencontro entre a chegada dos animais em territórios de reprodução, e o pico de abundância de alimento.

Dos autores que estudaram a adequação de habitats, que foram 8% deles, todos encontraram alterações causadas pelas mudanças climáticas, como redução na qualidade de recursos, ou alterações em regimes necessários para as espécies estudadas, como por exemplo um grou estudado por Orellana-Macías *et al*. (2020), que precisa que o nível d'água esteja num certo nível em um de seus territórios de descanso para prosseguir com sua migração, ou a situação de baleias e golfinho, que devem perder habitats por conta de mudanças na temperatura (Lezama-Ochoa *et al*., 2024).

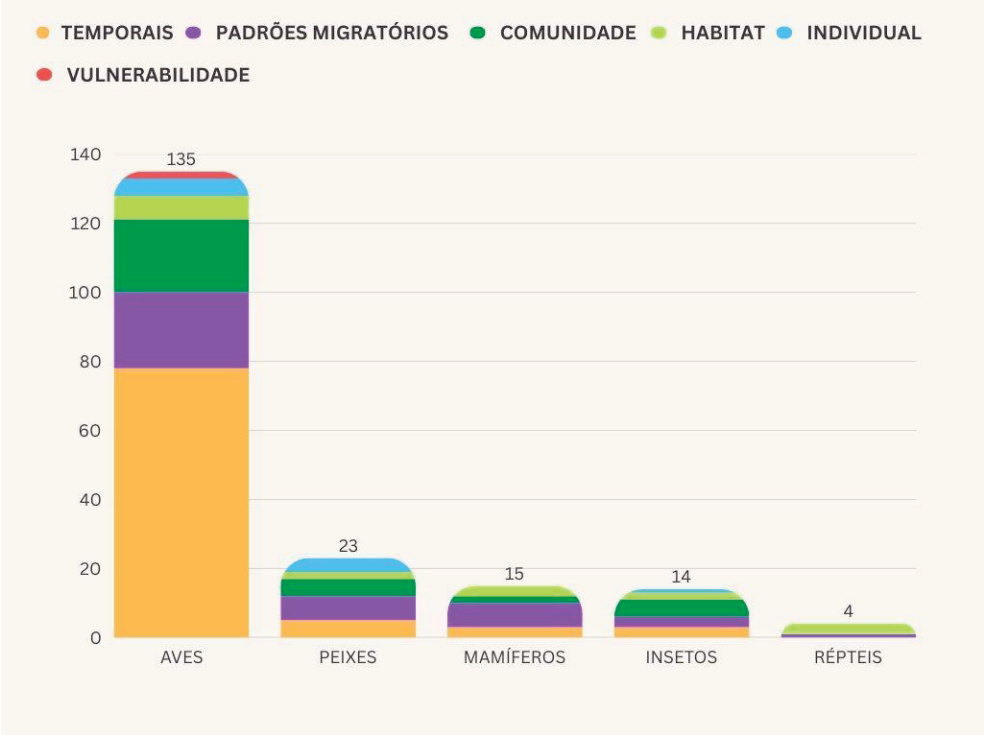
Os indicadores individuais foram o agrupamento mais diverso, com estudos medindo peso, tamanho, desenvolvimento, adaptação, gasto energético e genética dos animais. Esses estiveram presentes em apenas 5% dos estudos, e apenas um

deles não encontrou alteração, este medindo crescimento da espécie estudada. No restante dos estudos, alterações como redução de tamanho e peso, retardamento do crescimento, dificuldade de adaptação e maiores gastos energéticos durante a migração foram encontradas, apontando os impactos na escala individual dos animais migratórios.

Por último, apenas dois estudos analisaram a vulnerabilidade de algumas espécies migratórias utilizando um método específico, e por isso foram separados em sua própria categoria. O método se chama “Climate change vulnerability assessments (CCVA)”, e combina informações sobre o nível de exposição e de sensibilidade de uma espécie, para classificar o quão vulnerável ela está às mudanças climáticas. O índice parece muito interessante, porém dos estudos encontrados na revisão apenas estes dois o utilizaram, em ambos apontando riscos elevados para as espécies estudadas.

Quando são apresentados apenas os resultados dos indicadores estudados, como na figura 12, fica a impressão de uma tendência desproporcional no uso dos indicadores temporais, mas quando são divididos os indicadores estudados para cada grupo diferente, é possível notar um equilíbrio muito maior, como mostra a figura 13.

FIGURA 13 – INDICADORES ANALISADOS PARA CADA GRUPO DE ANIMAL ESTUDADO.



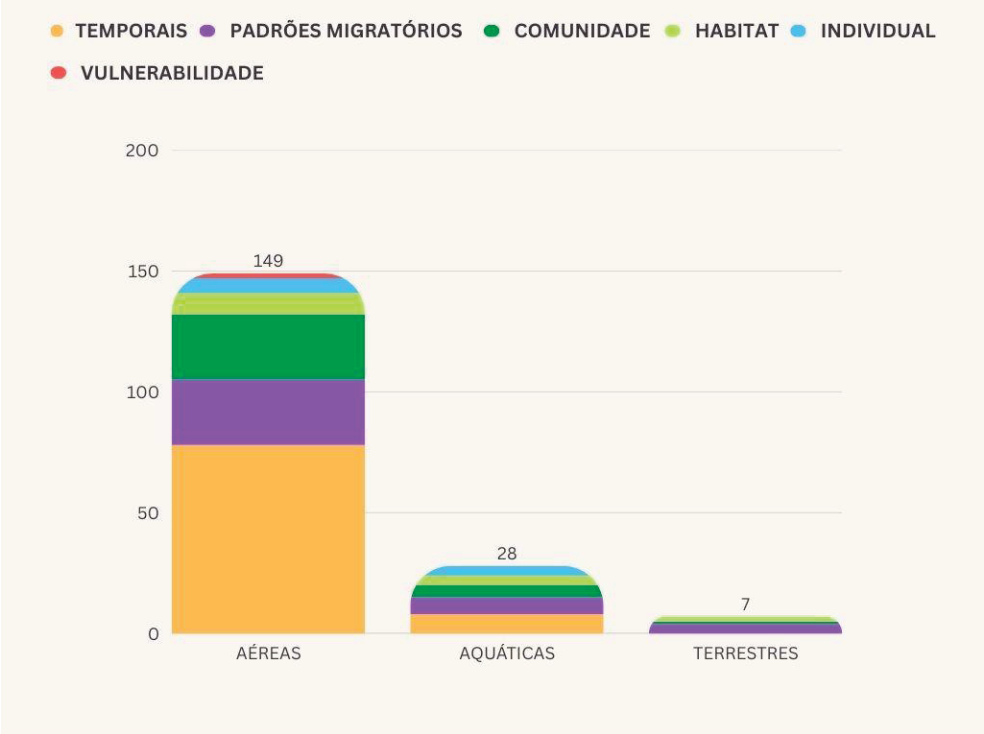
FONTE: Autoria própria (2024).

As aves, de fato, foram muito mais estudadas com uso de indicadores temporais, sendo mais de 55% dos indicadores analisados para o grupo, além disso, 22 indicadores de padrões migratórios e 21 indicadores de população foram analisados, uma quantidade expressiva, considerando que o total de indicadores analisados para peixes foi de 23. Nas aves também foram utilizados indicadores de habitat e individuais, em uma proporção muito menor, além de os dois únicos estudos focando indicadores de vulnerabilidade.

Ademais, os grupos seguintes, peixes, mamíferos e insetos, apresentaram proporções muito mais equilibradas entre indicadores estudados, sendo os indicadores de padrões migratórios e os indicadores de população, mais utilizados do que os temporais. A tendência mais acentuada encontrada para esses grupos foi o uso de indicadores de padrões migratórios nos estudos de mamíferos, sendo o método escolhido em quase 50% dos estudos. Os indicadores de padrões migratórios também foram o tipo mais utilizado nos estudos sobre peixes, enquanto para os insetos, indicadores de população foram mais usados. Quanto ao grupo dos répteis, há uma forte tendência no uso de indicadores de habitat, porém essa tendência pode não ser verdadeira devido ao baixo número de publicações encontradas sobre o grupo.

O método escolhido para medir alterações em cada grupo varia consideravelmente, porém pode ser feito o argumento que isso se deve ao meio que cada grupo mais frequentemente utiliza para migrar, considerando que a praticidade e eficiência de cada metodologia nas coletas de dados é muito diferente para cada tipo de migração. Sendo assim, foi analisada a proporção no uso de cada indicador para os meios migratórios, como apresentado na figura 14.

FIGURA 14 – INDICADORES ANALISADOS PARA CADA MEIO DE MIGRAÇÃO PESQUISADO.



FONTE: Autoria própria (2024).

Para cada tipo de migração foi encontrada uma proporção bastante diferente de indicadores utilizados, sendo as migrações aquáticas o único meio sem fortes tendências de indicadores escolhidos. Nas migrações aéreas, há uma tendência marcante no uso de indicadores temporais, principalmente por ser o indicador mais empregado em aves, enquanto nas migrações terrestres, a tendência é o uso de indicadores de padrões migratórios e de habitat.

A partir dos dados apresentados nessa seção, podemos discutir as tendências e lacunas encontradas, bem como compreender melhor como animais migratórios estão respondendo às mudanças climáticas.

5 DISCUSSÃO

Apesar de outras publicações terem sido encontradas fora da WOS contendo as palavras-chave em seus títulos, e mais publicações pudessem ter sido encontradas caso a pesquisa fosse mais abrangente (pesquisa por tópico ao invés de título), ainda assim a quantidade de estudos sobre as respostas de animais migratórios às mudanças climáticas é muito baixo, deixando muitas lacunas em aberto que podem ser exploradas futuramente.

Os dados apresentados revelam a tendência dos estudos serem realizados com o hemisfério norte como foco, deixando uma lacuna no conhecimento sobre as alterações ocorridas nos fenômenos migratórios no sul do planeta. Mais de 90% das publicações encontradas nesta pesquisa foram desempenhadas em instituições no norte global, principalmente europeias e norte americanas, refletindo a disparidade de investimento em conhecimento científico entre os hemisférios, além da desigualdade no acesso ao ensino superior, ambas as informações obtidas na base de dados do Banco Mundial.

Em países de renda alta, aproximadamente 80% da população tem acesso ao ensino superior, enquanto em países de renda média esse número cai pela metade, e em países de baixa renda o acesso ao ensino superior é disponível para apenas 10% da população. Enquanto isso, os gastos com o desenvolvimento de pesquisas científicas em percentual do PIB é em média o dobro para países de alta renda quando comparados a países de renda média e baixa, e quando se considera a diferença entre o PIB de cada um desses grupos, o espaço entre os dois aumenta ainda mais.

Devido a este fato, regiões com alta biodiversidade, como África e América do Sul se encontram sub-representadas no cenário da pesquisa, e a falta de informação sobre como mudanças climáticas afetam atualmente, e podem afetar futuramente espécies migratórias nestas regiões, cria uma situação desafiadora para a conservação dessas espécies, podendo se desencadear uma subestimação destes impactos e, consequentemente, uma falta de ações mitigadoras necessárias para proteger as populações mais vulneráveis.

Além disso, como é o caso com muitas espécies migratórias, longas migrações entre continentes é algo comum, e a lacuna no conhecimento dos impactos aos animais em uma parte da viagem pode causar a não compreensão

total dos motivos de alguma alteração, ou até mesmo a conclusões equivocadas sobre como uma espécie pode estar sendo afetada pelas mudanças climáticas.

Algo que reforça essa noção, são os dados apresentados na figura 16, sobre a origem das espécies estudadas. Enquanto apenas 8 estudos foram realizados com foco em algum local no continente africano, em 34 estudos a espécie estudada havia chegado no local de estudo vinda da África.

Outra tendência encontrada foi a de grupos estudados, com mais de 70% das publicações tendo foco em aves migratórias. Fica claro o viés em se estudar este grupo. Pode ser feito o argumento, em relação à grande representatividade de aves estudadas, que estes animais apresentam dados mais disponíveis, e por isso se tornam mais interessantes candidatos a estudos desta natureza. Isso pode ocorrer devido à mais fácil rastreabilidade de aves, principalmente quando comparadas a espécies aquáticas, além da grande quantidade de pessoas que têm como hobby observar aves, criando assim uma rede de informações muito robusta sobre o grupo em geral.

Também entende-se que esta tendência pode ter ocorrido devido ao grande número de aves migratórias, segundo Robinson *et al*. (2009), mais de 1500 espécies são conhecidas, porém outros grupos menos representados nas publicações também apresentam números altos de espécies migratórias, como os peixes, que apresentam mais de 870 espécies migratórias, mas apenas 18 publicações, sendo grande parte delas com caráter econômico. Outro grupo com essa mesma característica foram os insetos, que, segundo Holland (2006), apresentam uma abundância de indivíduos migratórios que ultrapassa qualquer migração aérea, mas tiveram apenas 7 estudos publicados, e a maioria destes com foco em possíveis impactos econômicos, principalmente à agricultura, que de fato é uma preocupação de grande importância, porém ressalta a baixa representatividade em estudos de conservação destes animais que são vitais para a manutenção e saúde dos ecossistemas.

Mamíferos também apresentam números expressivos de espécies migratórias, havendo 186 espécies segundo Robinson *et al*. (2009), mas a situação deste grupo difere um pouco dos anteriores. Ao todo, 12 publicações trataram de espécies migratórias de mamíferos, porém apenas uma delas sobre morcegos, e sendo 113 destas 186 espécies apontadas por Robinson pertencentes a este grupo, é possível notar uma lacuna significativa. Mais um agravante dessa falha é o fato de

os morcegos serem ótimos bioindicadores de mudanças no clima devido à sua sensibilidade (Adams, 2017), sendo assim, há uma necessidade de mais estudos serem realizados sobre esses animais neste contexto.

Apesar de apresentarem números baixos de espécies migratórias, apenas 7, também seria interessante que mais estudos fossem feitos sobre tartarugas marinhas, podendo ser obtidos resultados importantes para compreender melhor o impacto das mudanças climáticas em animais migratórios marinhos, considerando que as tartarugas marinhas surgiram no período cretáceo, há cerca de 120 milhões de anos atrás (Projeto Tamar), e passaram por diversos períodos de alterações climáticas durante a história, sendo assim, poderiam se revelar ótimos bioindicadores para as mudanças no clima atuais.

Apesar de nenhum estudo ter sido encontrado nesta revisão, alguns anfíbios e crustáceos também apresentam comportamento migratório, a maioria curto, porém todos se encaixando nos parâmetros estabelecidos para considerar uma espécie migratória. Para crustáceos, dois estudos haviam sido encontrados antes das triagens, porém na triagem final foram excluídos por não tratarem de mudanças climáticas, já o grupo dos anfíbios de fato não foi encontrado. A sub-representação de ambos os grupos é preocupante, e pode acarretar uma falta de medidas significativas para a preservação destas espécies.

Também ficou evidente a falta de estudos focados em compreender as alterações sofridas por espécies migratórias aquáticas e terrestres, enquanto as migrações aéreas foram bastante pesquisadas. Tanto quanto seria importante conhecer melhor como cada grupo de animal responde às alterações climáticas, entender como os diferentes tipos de estratégias migratórias enfrentam as mudanças pode ampliar nossa visão de como serão os desafios que esses animais terão que enfrentar, e como podemos mitigar os impactos sofridos por eles para estabelecer melhores e mais eficazes políticas de conservação.

Quanto às distâncias migradas, as mais estudadas foram as longas, com até estudos sobre ambas, longas e curtas, sendo mais prevalente do que publicações focando apenas em migrantes de curta distância. Muitos motivos podem ser atribuídos a isso, o principal, consiste em compreender as adaptações nestes animais, que atravessam grandes espaços, muitas vezes com climas vastamente diferentes, e dependem de encontrar ambientes adequados ao longo do caminho e em seu destino final. Porém, em muitas ocasiões, principalmente em anos mais

quentes, migrantes de longa distância têm encontrado ambientes radicalmente diferentes dos encontrados no passado, o que hoje em dia já causa desencontro em relações sensíveis ao tempo, como a reprodução e a abundância de alimento (Both *et al*., 2008).

As estações do ano são de grande importância quando o assunto são espécies migratórias, considerando que os sinais que desencadeiam as migrações vêm com as mudanças de estação. Logo, foi considerado importante contabilizar quantos estudos analisam as diferentes estações do ano.

A maior parte dos movimentos migratórios ocorre durante primavera e outono, um leva os animais para seus territórios de reprodução, e o outro para seus territórios de inverno. Então era de se esperar que as estações mais estudadas fossem as duas, porém, a diferença entre elas é significativa.

Estimo que, o motivo para tantos estudos analisarem a primavera ao invés do outono, tem relação com os locais de estudo, os grupos mais estudados e as formas de analisar espécies migratórias. A maior parte dos estudos foi conduzido na Europa e América do Norte, locais que recebem muitas aves para a temporada reprodutiva, e correlacionando dados encontrados sobre os indicadores analisados, os indicadores mais medidos foram os temporais, principalmente, a chegada de indivíduos no local. Assim, a primavera, que leva os animais de seus territórios de inverno para essas regiões, acabou sendo muito mais estudada.

Caso mais estudos sejam realizados em locais como a África, por exemplo, é possível que a quantidade de estudos com enfoque no outono aumente, uma vez que muitas aves migratórias vão em direção à África durante o outono. Seria importante que estudos com esse enfoque fossem realizados, assim possibilitando a melhor compreensão das dificuldades enfrentadas pelos animais no caminho de volta para seus territórios de inverno.

Estudos focados nas épocas de verão e inverno foram menos representados, o que faz sentido, considerando a questão dos movimentos migratórios, ainda assim, seria fundamental acrescentar ao conhecimento das alterações sofridas durante estes períodos. No verão, os animais estão se reproduzindo, o que representa um momento delicado na manutenção das populações, e no inverno, boas condições para o acúmulo de energia são imprescindíveis para que o ciclo se mantenha equilibrado.

Uma quantidade relevante de publicações estudou o comportamento de espécies migratórias o ano inteiro, o que ajuda bastante no conhecimento geral do ciclo migratório das espécies estudadas. Seria interessante ver mais estudos como esse no futuro.

Outro ponto fundamental para compreender o estado atual da pesquisa sobre migrações, foi a análise da proporção de estudos que se concentram em apresentar o cenário atual dos fenômenos migratórios em comparação àqueles que buscam prever tendências futuras.

Os dados revelaram que a maior parte, cerca de 70% das publicações, focam principalmente em relatar a situação presente, coletando e analisando dados empíricos sobre os padrões migratórios observados. Esses estudos fornecem um panorama das alterações sofridas e espécies afetadas, já identificadas em função de fatores climáticos. Por outro lado, o menor número de pesquisas que se dedicam à formulação de modelos preditivos não é ideal, considerando o papel fundamental que estes estudos têm em orientar ações de conservação e políticas públicas.

É clara a importância de estudos demonstrando o cenário atual dos impactos sofridos às espécies migratórias, porém a desproporção entre esses dois tipos de abordagem idealmente deveria ser reduzida no futuro, com foco em expandir a compreensão sobre os possíveis impactos futuros, guiando políticas públicas a tomarem ações informadas para proteger essas espécies.

Também foram investigados quantos estudos citam o uso das espécies analisadas como bioindicadores, tendo em conta que espécies sensíveis a alterações como as migratórias apresentam uma ótima oportunidade para investigar a saúde de ecossistemas, sejam eles os de reprodução e invernada, ou os que são utilizados como pontos de parada no meio das migrações. Porém, poucos estudos citam a palavra indicador neste contexto, apesar de fundamentalmente serem estudos de bioindicadores, de certa maneira. Essa lacuna abre uma boa oportunidade para ser mais explorada por estudos futuros buscando pesquisar sobre a saúde de ecossistemas, e podem ser importantes ferramentas para medir impactos de mudanças climáticas.

Quanto à análise dos indicadores estudados pelos autores, fica evidente a gravidade das alterações sofridas por espécies migratórias no cenário de mudanças climáticas atual. Seis categorias de indicadores bastante distintos foram observados,

e para todas, 95% ou mais dos autores reportaram alterações, destacando a amplitude dos impactos sofridos por essas espécies.

Tais alterações devem ser vistas apenas como a ponta do iceberg, levando em consideração o efeito cascata que pode se desencadear nos ecossistemas dependentes de espécies migratórias.

Alterações na fenologia das espécies se mostrou comum nos estudos analisados, indicando a urgência detectada por espécies migratórias em alterar sua cronologia a fim de se adaptar às mudanças na fenologia dos ambientes dos quais dependem, fato destacado por diversos autores, como Cotton (2003). Tais alterações podem desencadear diversos desencontros entre espécies que dependem umas das outras, como evidenciado no estudo feito por Gicquel *et al*. (2022), além de deixar espécies migratórias menos flexíveis a mudanças em risco de extinção (Both *et al*., 2006).

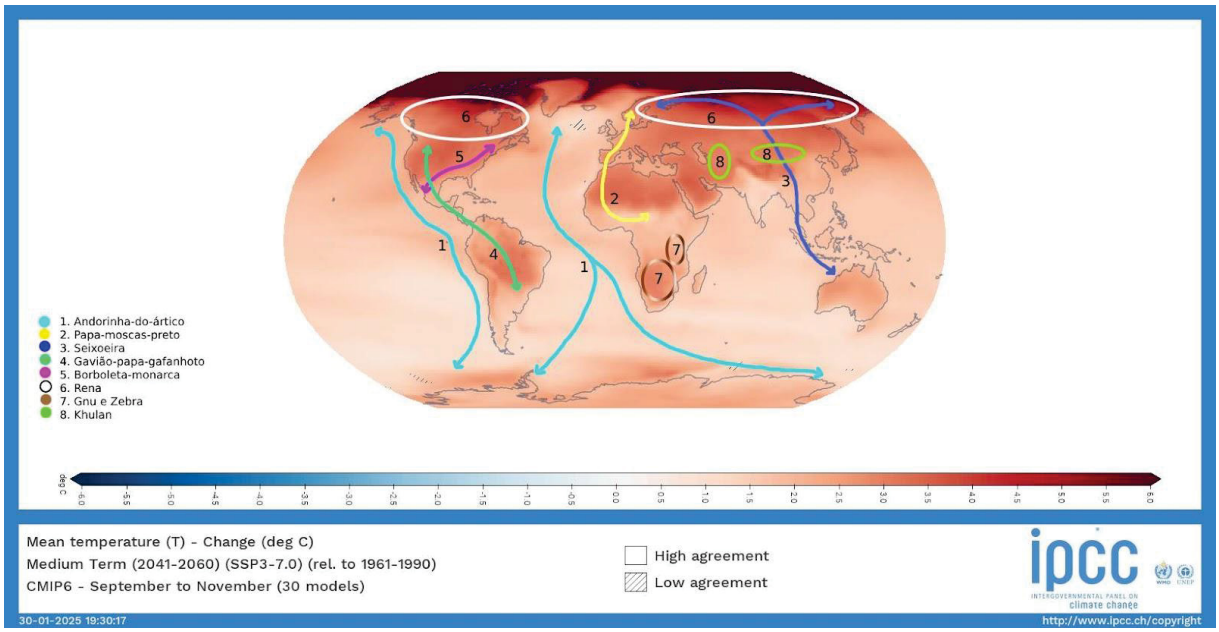
Muitas outras espécies recorrem a alterações em seus padrões migratórios, e neste cenário diversas outras consequências podem seguir. Para espécies que aceleram suas migrações para tentar acompanhar o adiantamento da fenologia de plantas e insetos, pode ocorrer um adiantamento excessivo, encontrando pouco alimento em seu destino ao fim da migração (Both e Marvelde, 2007). Já nas espécies que alteram suas distribuições para comportar melhor suas necessidades, permanecendo mais próximas aos polos, ou em maiores altitudes (Lezama-Ochoa *et al*., 2024; Da Silveira *et al*., 2021), novas situações de competição por recursos podem ocorrer, podendo afetar populações das próprias espécies migratórias ou de espécies residentes que tenham que enfrentar uma competição maior por estes recursos (Sparks *et al*., 2007), além da degradação de habitats não preparados para lidar com a presença destes indivíduos (Campeau *et al*., 2019).

Além disso, também foi notada na análise das publicações uma redução nas populações (Moller *et al*., 2008), indivíduos menores (Rubolini *et al*., 2005) e habitats menos adequados (Liang *et al*., 2021). Essas alterações consistentes indicam um impacto contínuo das mudanças climáticas sobre os fenômenos migratórios, sugerindo um futuro muito preocupante para essas espécies.

Com o objetivo de facilitar a visualização do problema, foram elaborados quatro mapas projetando as rotas migratórias de algumas espécies, sob diferentes condições climáticas, utilizando o cenário SSP3-7.0 para o período médio de 2041-2060, em comparação com os dados de referência de 1961-1990. As

variáveis analisadas foram a temperatura média e a temperatura da superfície da água, com a projeção dividida em dois períodos sazonais: março a maio e setembro a novembro.

FIGURA 15 – ROTAS MIGRATÓRIAS AÉREAS E ALTERAÇÕES NA TEMPERATURA MÉDIA DE SETEMBRO À NOVEMBRO.



FONTE: IPCC; IUCN RedList (2024).

Em todos os mapas é possível perceber os maiores gradientes de temperatura próximos aos polos. Segundo o relatório de 2022 do IPCC, os pólos devem ser as regiões com maior aumento de temperaturas médias no futuro, em especial o ártico, que devido ao aquecimento deve perder uma quantidade significante de gelo, o que por sua vez deverá aumentar a absorção de luz solar, contribuindo ainda mais para seu aquecimento. Logo, espécies que dependem de tais regiões podem sofrer sérias consequências em decorrência das alterações que podem ser desencadeadas por este aumento nas temperaturas.

Espécies como as renas, listadas como vulneráveis na IUCN Red List, devem sofrer com o derretimento mais rápido do gelo, considerando que atravessam lagos congelados durante suas migrações, economizando tempo e energia (Sharma *et al.*, 2009). Com o degelo ocorrendo mais cedo, essa espécie deverá recorrer a contornar esses lagos, gastando mais energia e aumentando a mortalidade da população (Leblond *et al.*, 2016), ou a alterar sua distribuição mais ao norte,

causando impactos aos ecossistemas lá presentes (Campeau *et al*., 2019). Além disso, maiores temperaturas podem aumentar a incidência de parasitas e mosquitos, causando aumento na mortalidade das renas, algo que já ocorre hoje em dia em alguns locais, como reportado na Finlândia (Laaksonen *et al*. 2010).

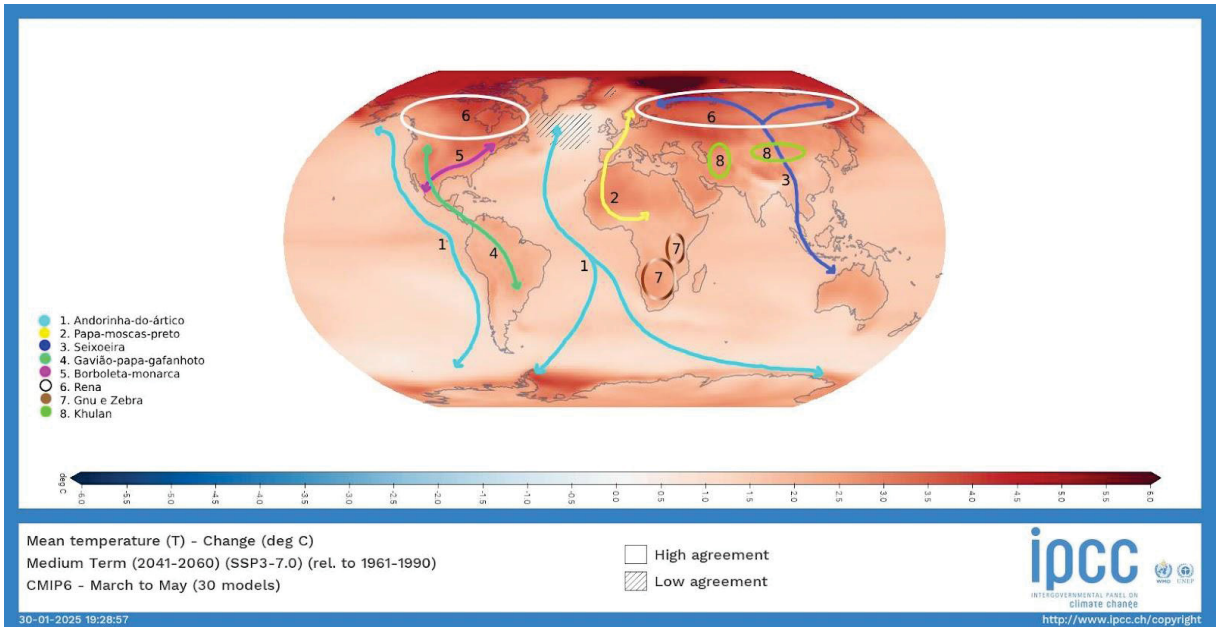
Espécies mais flexíveis a mudanças podem se adaptar melhor às crescentes alterações no clima, mas ainda podem ser afetadas por outros fatores desencadeados pelas mudanças climáticas, como é o caso da andorinha-do-ártico, que apesar de apresentar declínio populacional, não é um declínio suficiente para ser considerada ameaçada pelos padrões estipulados pela IUCN Red List, ainda assim, enfrenta reduções significativas nas populações de uma de suas principais presas, a galeota, que tem seu declínio populacional associado ao aumento na temperatura do Mar do Norte (Vigfusdottir *et al*. 2013). A redução desta fonte de alimento, por sua vez, pode ser relacionado à falta de sucesso reprodutivo dessa andorinha, causada por subnutrição dos filhotes e abandono de ninhos (Vigfusdottir 2012). Outra espécie enfrentando dificuldades reprodutivas decorrentes do mesmo motivo é a Seixoeira, que apresenta um declínio populacional estimado entre 10% e 29%, segundo a IUCN Red List, reforçando argumentos de espécies sendo afetadas indiretamente pelas mudanças no clima.

A disponibilidade de alimento em momentos específicos é essencial para a sobrevivência de animais migratórios, e a dessincronização entre a cronologia da espécie migratória e do alimento em sua chegada pode ser uma barreira preocupante para algumas espécies.

O papa-moscas-preto, por exemplo, notoriamente tem adiantado sua migração, chegando cada vez mais cedo em seus territórios de reprodução (Ahola *et al*., 2004, Hüppop e Winkel, 2006, Gienapp *et al*., 2007), porém a espécie ainda encontra dificuldades em ajustar sua longa migração ao tempo de abundância de alimentos, que adiantou ainda mais do que a fenologia da ave (Cotton, 2003). Para se adaptar a este avanço, a ave deve adiantar ainda mais sua migração, porém isso pode não ser possível, considerando que os animais não adiantaram sua migração de volta para os territórios de inverno, causando problemas no ciclo migratório (Both e Visser, 2001). O desencontro tem causado declínio populacional nesta espécie, e tal declínio deve aumentar caso a fenologia de plantas e insetos continue adiantando como é esperado devido ao aumento das temperaturas (Both *et al*., 2006).

Apesar de não estar completamente adaptado, o papa-moscas-preto apresentou plasticidade suficiente para ajustar sua migração, mas o mesmo pode não ser possível para outras espécies, que podem apresentar alguma constrição em seu comportamento migratório, que não permita que adiante sua fenologia, ou pode ter o comportamento amplamente herdado, não possibilitando o grau necessário de ajustes para sobreviver (Cotton, 2003, Both e Marvelde, 2007, Miller-Rushing *et al*., 2008).

FIGURA 16 – ROTAS MIGRATÓRIAS AÉREAS E ALTERAÇÕES NA TEMPERATURA MÉDIA DE MARÇO A MAIO.



FONTE: IPCC; IUCN RedList (2024).

Além do adiantamento no pico de alimentos, estima-se que a duração da disponibilidade de alimento deve diminuir, uma vez que plantas e insetos crescem mais rápido em temperaturas mais altas (Both *et al*., 2006), logo, espécies com dietas mais restritas a plantas e insetos devem enfrentar uma pressão maior do que animais menos dependentes destes alimentos (Bitterlin e Van Buskirk, 2014), como é o caso do gavião-papa-gafanhoto, que tem sua dieta baseada em pequenos mamíferos, assim não apresentando a mesma constrição temporal de outras espécies migratórias de longas distâncias.

Outro fator crucial a ser considerado são eventos climáticos extremos associados aos regimes de precipitação. Longos períodos de seca podem causar

declínios populacionais acentuados, que quando associados a outros estressores podem ser catastróficos. O khulan, por exemplo, habita áreas áridas com alta variabilidade de água e pasto disponível, então quando enfrentam grandes secas, precisam percorrer longas distâncias atrás de recursos, o que pode ser impedido por barreiras físicas, como cercas colocadas em torno de propriedades (Kaczensky *et al*. 2011), causando um declínio estimado de 20% da população selvagem para essa espécie nas próximas três gerações. O mesmo acontece com zebras e gnus no continente africano, e já foi a causa de eventos de mortalidade em massa (Owens and Owens 1980).

As alterações nos regimes de chuva podem ser fator determinante para espécies migratórias para muito além dos eventos de seca extrema, como citado por Bracis e Mueller (2017), que as alterações nos regimes de chuva devem afetar o tempo de migração das zebras e gnus na região. Consequentemente, predadores que dependem destes animais passando dentro de seus territórios, podem ser afetados em momentos cruciais por essas variações, como durante o período de lactação para as hienas (Gicquel *et al*., 2022).

Além disso, chuvas excessivas também podem impactar severamente outras espécies migratórias, como as borboletas-monarca, que devido à sua fragilidade, necessitam que as tempestades sejam contidas pelo dossel da floresta, o que não ocorreu num evento extremo em 2002, resultando em mais de 500 milhões de indivíduos mortos (Brower *et al*. 2002). Segundo Oberhauser e Petersen (2003), a elevação das temperaturas e das precipitações no inverno devem tornar os locais de hibernação dessas borboletas inadequados no futuro, e para Fisher *et al*. (2018), o mesmo motivo deve levar a espécie a alterar sua distribuição, se afastando da costa e procurando locais mais altos.

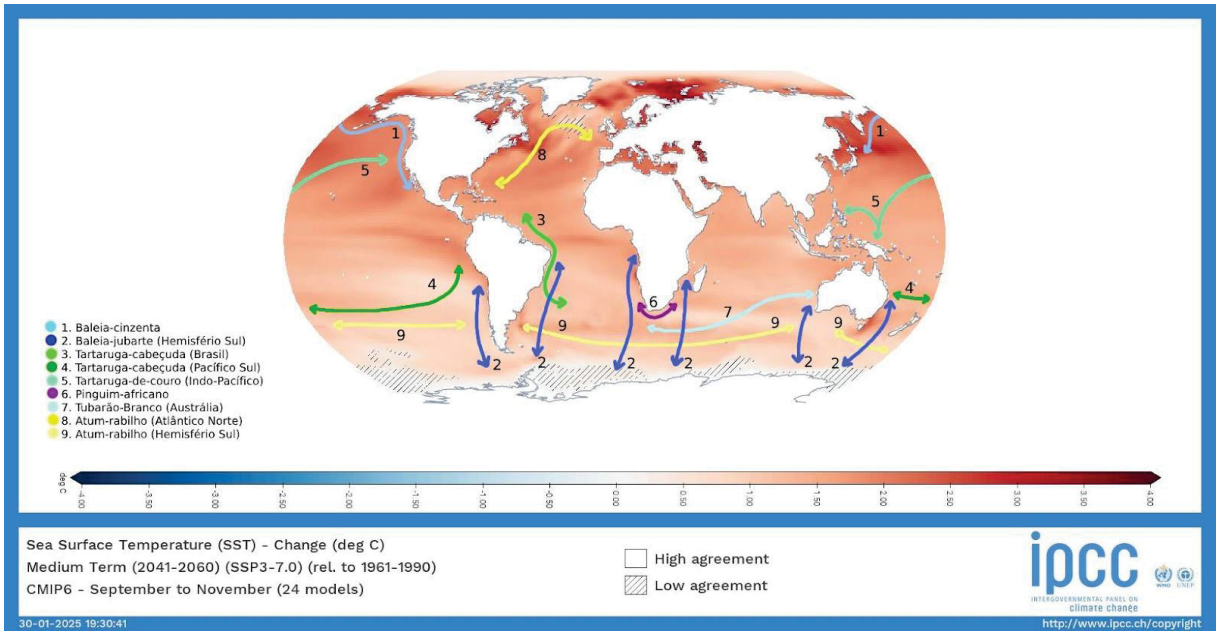
A mudança de distribuição é a resposta encontrada por muitas espécies para as mudanças climáticas, principalmente se deslocando em direção aos polos, onde as temperaturas podem ser mais amenas, e as condições de alimento mais favoráveis (Lezama-Ochoa *et al*., 2024). Ainda segundo Lezama-Ochoa, alterações de distribuição são uma das respostas mais reportadas diante das mudanças climáticas em ambientes marinhos, tendo sido observadas em espécies marinhas de todas as regiões.

Segundo Salvadeo *et al*. (2015), baleias-cinzentas já apresentam mudanças em sua distribuição correlacionadas às mudanças no clima causadas

pelo El Niño, utilizando locais para a reprodução mais ao norte quando o efeito do El Niño causa as águas a ficarem mais quentes, e mais ao sul quando La Niña causa resfriamento.

Ainda segundo Salvadeo *et al*. (2015), as baleias-cinzentas escolhem seus locais de reprodução baseados na extensão de gelo em suas zonas de alimentação no ano anterior, então, conforme a temperatura dos oceanos aumenta, seus territórios podem se deslocar cada vez mais ao norte.

FIGURA 17 – ROTAS MIGRATÓRIAS MARINHAS E ALTERAÇÕES NA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA ÁGUA DE SETEMBRO A NOVEMBRO.

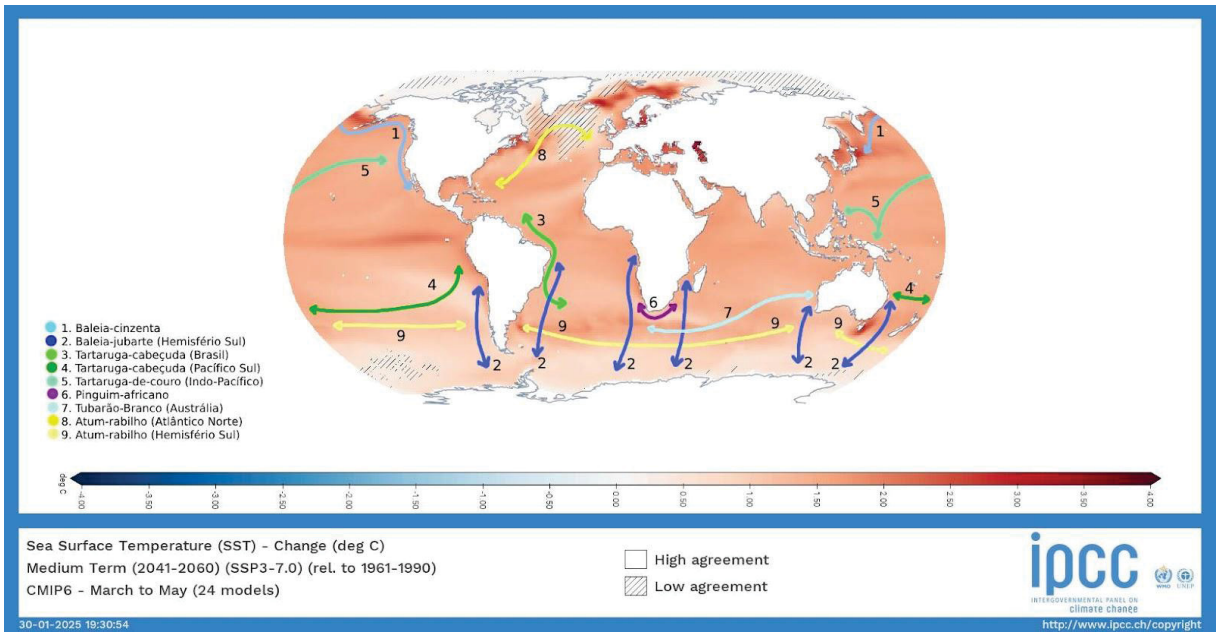


FONTE: IPCC; IUCN RedList (2024).

Algumas espécies possuem necessidades mais estreitas do ambiente, ou apresentam menor tolerância térmica, o que pode desencadear uma perda de territórios, como é o caso com a baleia-jubarte, estudada por Lezama-Ochoa *et al*. (2024). Segundo os autores, que estudaram populações da baleia na costa oeste dos Estados Unidos, a espécie está projetada a perder habitats adequados mais ao sul, perdendo território, o que pode acarretar na dessincronização entre temporadas de reprodução e reprodução, causando consequências no sucesso reprodutivo da espécie. O mesmo pode ser verdade para as populações que habitam a Antártica, porém mais estudos devem ser realizados com essas populações para que essa teoria possa ser avaliada.

A perda de habitat devido ao aumento da temperatura dos oceanos deve afetar diversas espécies no futuro, causando grandes declínios populacionais. Peixes endotérmicos, como o atum-rabilho, podem perder habitats usados para a reprodução, como é previsto no Golfo do México (Muhling *et al*. 2014), que associado a outros estressores, como a pesca excessiva e derramamentos de óleo, devem afetar gravemente suas populações.

FIGURA 18 – ROTAS MIGRATÓRIAS MARINHAS E ALTERAÇÕES NA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA ÁGUA DE MARÇO A MAIO.



FONTE: IPCC; IUCN RedList (2024).

As mudanças de distribuição em populações no oceano têm o potencial de ser muito impactantes para as espécies que dependem dessas populações como forma de alimento, associados à pesca excessiva, podem causar armadilhas ecológicas para espécies historicamente acostumadas a caçar em áreas específicas (Sherley *et al*. 2017), podendo resultar em declínios catastróficos de população, que é o que acontece com o pinguim-africano, projetado para ter uma redução de 80% em sua população nas próximas gerações (IUCN Red List), e é o que ocorreu com as populações de tubarão-branco no mar mediterrâneo, que hoje em dia é extremamente raro na região.

Algumas espécies enfrentam problemas mais específicos devido às mudanças no clima, como é o caso com as tartarugas marinhas, que dependem da

temperatura em que seus ovos são incubados para a determinação do sexo dos filhotes, para estes animais, temperaturas mais altas durante a incubação resultam em uma proporção maior de fêmeas, enquanto temperaturas mais baixas resultam em mais machos.

Todas as tartarugas marinhas estão listadas na IUCN Red List como vulneráveis, ameaçadas ou criticamente ameaçadas, sendo as espécies representadas nas figuras 16 e 17, tartaruga-cabeçuda e tartaruga-de-couro, ambas listadas como vulneráveis, devido a reduções populacionais significativas nas últimas gerações, aproximadamente 47% e 40%, respectivamente. Diversos fatores contribuem para o declínio populacional destes animais, como capturas acidentais por redes de pesca e ingestão de plástico, porém fatores climáticos podem ser o maior risco para a manutenção futura destas espécies.

O aumento dos níveis dos oceanos, eventos climáticos extremos e o aumento da temperatura dos ninhos podem prejudicar o sucesso reprodutivo das tartarugas marinhas (Wallace *et al*., 2013), o último sendo particularmente relevante. Segundo o projeto tamar (2011), a maior parte das tartarugas marinhas nascidas no Brasil são fêmeas, com alguns estados registrando entre 89,3% a 100% de fêmeas, fato que em algumas gerações pode afetar consideravelmente a viabilidade reprodutiva destes animais.

Considerando impactos diretos e indiretos, as mudanças climáticas têm um potencial destrutivo estarrecedor na biodiversidade do planeta, e mesmo com toda a pesquisa já feita sobre o tema, pouco se sabe sobre todos os efeitos que podem afetar os mais diversos tipos de animais, com as mais diversas estratégias. Para as espécies migratórias, existem enormes lacunas no conhecimento a serem preenchidas, como grupos pouco pesquisados, locais menos focados, e interações e casos específicos a serem desvendados, e, para que seja possível criar estratégias concretas para a preservação dessas espécies, muito ainda deve ser feito.

6 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, foram encontradas diversas lacunas no conhecimento quando se associam espécies migratórias a mudanças climáticas. Muitas dessas lacunas são devido às estruturas já estabelecidas da sociedade moderna, favorecendo o norte global e os continentes mais desenvolvidos, assim trazendo mais atenção a alguns locais, problemas e espécies.

Também foram encontradas tendências favorecendo o estudo de alguns grupos de animais, principalmente aves, que pode ser associado à qualidade de informação presente para o estudo desses animais. Ainda assim, mesmo para as aves migratórias ainda há muito conhecimento a ser revelado, e para outros grupos as lacunas são ainda mais notáveis, como para os peixes e insetos, que apresentam uma diversidade significativa, mas foram estudados em uma proporção baixa das publicações.

Quanto aos indicadores estudados, se revelaram tendências ao uso de certos indicadores para grupos e tipos de migrações diferentes, deixando outras informações relevantes para os grupos, menos compreendidas. Por exemplo as aves e espécies migratórias aéreas, que apresentaram uma quantidade de dados temporais muito maiores do que qualquer outro tipo de dado, criando possíveis lacunas sobre como esses animais estão reagindo às alterações no clima, para além das alterações na fenologia. Da mesma forma, estudos sobre mamíferos e espécies migratórias terrestres apresentaram tendência a utilizar indicadores de padrões migratórios, sem apresentarem nenhum resultado para indicadores individuais.

O problema causado pelas mudanças climáticas a este grupo de animais extremamente vulneráveis é preocupante, e as consequências futuras de um declínio populacional em massa dessas espécies podem ser catastróficas, não só para a biodiversidade do planeta, mas também para todos os ecossistemas, considerando todas as interações que seriam afetadas por um evento como esse.

A partir disso, hoje sabe-se que o avanço na fenologia de plantas e insetos causa o avanço nos comportamentos migratórios de milhares de espécies, que recorrem a iniciar suas migrações mais cedo ou de forma mais rápida, às vezes até alterando seus territórios para se adaptar às mudanças. As espécies sem a plasticidade necessária para se adaptar às rápidas alterações devem enfrentar uma grande desvantagem, perdendo o pico de abundância de alimentos em seus

territórios. Outras espécies encontram barreiras fisiológicas, perdendo habitat por não estarem adaptadas a temperaturas mais altas, ou até apresentando maiores índices de mortalidade. Ademais, todos esses animais enfrentam outros estressores, que associados à pressão causada pelas mudanças no clima, dificultarão a sobrevivência de inúmeras espécies.

Além disso, foi bastante detectada uma grande quantidade de animais alterando suas distribuições em busca de ambientes mais favoráveis, e muitas dessas espécies terão dificuldade de encontrar locais adequados e devem apenas perder grandes extensões de habitat, e que eventos climáticos extremos podem ser o motivo para muitas destas espécies apresentarem quedas catastróficas de população. Porém, para que seja possível compreender as reais dimensões do problema, devem ser estudadas as interações entre as espécies e ambientes, pois o verdadeiro impacto que será causado serão os efeitos que irão suceder essas alterações.

É de grande importância a realização de estudos sobre as respostas de espécies migratórias às mudanças climáticas no sul global, principalmente nos continentes da África e da América do Sul, que foram o foco de poucos estudos, apesar da relevância de suas biodiversidades. Também é necessário que as respostas de outros grupos de animais migratórios sejam mais estudadas, principalmente grupos com uma diversidade alta de espécies migratórias, como os insetos e peixes, além dos morcegos no grupo dos mamíferos.

Estudos futuros devem aumentar o equilíbrio nos indicadores utilizados para cada grupo, buscando um maior conhecimento geral sobre adaptações e riscos corridos por cada grupo e tipo de migrador, possibilitando a elaboração de planos melhores e mais completos para a conservação destas espécies.

Nesse contexto, este estudo apoia a identificação de quais lacunas têm a maior necessidade de serem preenchidas, e quais tendências poderiam ser evitadas, de modo que o conhecimento sobre espécies migratórias e mudanças climáticas se expanda com eficiência, e seja possível apoiar melhores tomadas de decisão sobre conservação no futuro.

REFERÊNCIAS

ABRAHMS, B. *et al*. Memory and resource tracking drive blue whale migrations. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, p. 5582–5587, 2019.

ADAMS, R. A. Dark side of climate change: species-specific responses and first indications of disruption in spring altitudinal migration in myotis bats. **Journal of Zoology**, v. 304, n. 4, p. 268–275, 2017.

AHOLA, M. *et al*. Variation in climate warming along the migration route uncouples arrival and breeding dates. **Global Change Biology**, v. 10, n. 9, p. 1610–1617, 2004.

ALERSTAM, T. Optimal migration strategies in birds. **Journal of Theoretical Biology**, v. 142, n. 4, p. 345-360, 1990.

ALERSTAM, T.; BÄCKMAN, J. Ecology of animal migration. **Current Biology**, v. 28, n. 17, p. R968–R972, 2018.

ALMPANIDOU, V.; MARKANTONATOU, V.; MAZARIS, A. D. Thermal heterogeneity along the migration corridors of sea turtles: implications for climate change ecology. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 520, p. 151223, 2019.

ANTHES, N. Long-distance migration timing of Tringas and pipers adjusted to recent climate change. **Bird Study**, v. 51, n. 3, p. 203–211, 2004.

ANTTILA, K. *et al*. Facing warm temperatures during migration: cardiac mRNA responses of two adult Oncorhynchus nerka populations to warming and swimming challenges. **Journal of Fish Biology**, v. 84, n. 5, p. 1439–1456, 2014.

AUGUST, S. M.; HICKS, B. J. Water temperature and upstream migration of glass eels in New Zealand: implications of climate change. **Environmental Biology of Fishes**, v. 81, n. 2, p. 195–205, 2007.

BAKER, M. B.; VENUGOPAL, P. D.; LAMP, W. O. Climate change and phenology: Empoasca fabae (Hemiptera: Cicadellidae) migration and severity of impact. **PLOS ONE**, v. 10, n. 5, e0124915, 2015.

BALL, T. The migration of geese as an indicator of climate change in the southern Hudson Bay region between 1715 and 1851. **Climatic Change**, v. 5, n. 1, p. 85–93, 1983.

BANCO MUNDIAL. World Development Indicators. Washington, DC: **Banco Mundial**, 2023.

BELL, C. P. Climate change and spring migration in the Yellow Wagtail Motacilla flava: an Afrotropical perspective. **Journal of Ornithology**, v. 148, n. S2, p. 495–499, 2007.

BELL, J. R. *et al*. Long-term phenological trends, species accumulation rates, aphid traits and climate: five decades of change in migrating aphids. **Journal of Animal Ecology**, v. 84, e. 1, p. 21-34, 2015.

BIRD LIFE INTERNATIONAL. State of the World's Birds: Indicators for Our Changing World. Cambridge: **BirdLife International**, 2018.

BITTERLIN, L. R.; VAN BUSKIRK, J. Ecological and life history correlates of changes in avian migration timing in response to climate change. **Climate Research**, v. 61, n. 2, p. 109-121, 2014.

BOTH, C.; VISSER, M. E. The effect of climate change on the timing of bird migration. **Global Change Biology**, v. 7, n. 5, p. 515-520, 2001.

BOTH, C., VISSER, M. E. Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird. **Nature**, 411, 296–298. 2001.

BOTH, C. Climate change and the arrival of migratory birds: A changing world. **Climate Research**, v. 32, n. 2, p. 253-264, 2006.

BOTH, C. *et al*. Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. **Nature**, v. 441, n. 7089, p. 81–83, 2006.

BOTH, C.; TE MARVELDE, L. Climate change and timing of avian breeding and migration throughout Europe**. Climate Research**, v. 35, n. 1-2, p. 93-105, 2007.

BOTH, C. Climate change and its impact on migratory birds. **Bird Conservation International**, v. 18, n. 3, p. 291-301, 2008.

BRACIS, J. S.; MUELLER, T. The role of resource dynamics in migratory behavior. **Animal Migration**, v. 10, n. 1, p. 23-33, 2017.

BROWER, L. *et al*. Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the Monarch Butterfly in Mexico, 1971–1999. **Conservation Biology**, v. 16, p. 346-359, 2002.

BULLUCK, L.; HUBER, S.; VIVERETTE, C.; BLEM, C. Age-specific responses to spring temperature in a migratory songbird: older females attempt more broods in warmer springs. **Ecology and Evolution**, 2013.

BURGER, C. *et al*. Fitness consequences of northward dispersal as possible adaptation to climate change, using experimental translocation of a migratory passerine. **PLOS ONE**, v. 8, n. 12, e83176, 2013.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R.; HUYVAERT, K. P. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 65, n. 1, p. 23-35, 2011.

CAMPEAU, A. B. *et al*. Long-term changes in the primary productivity of migratory caribou (Rangifer tarandus) calving grounds and summer pasture on the Quebec-Labrador Peninsula (Northeastern Canada): the mixed influences of climate change and caribou herbivory. **Polar Biology**, 2019.

CHAMBERS, L. E. Migration dates at Eyre Bird Observatory: links with climate change? **Climate Research**, v. 29, n. 2, p. 157-165, 2005.

COLEY, P. D. Habitat-specific changes in migratory patterns of birds in response to climate change. **Oecologia**, v. 114, n. 1, p. 149-156, 1998.

COTTON, P. A. Avian migration phenology and global climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 100, n. 21, p. 12219–12222, 2003.

COX, G. W. The evolution of avian migration systems between temperate and tropical regions of the new world. **American Naturalist**, v. 126, p. 451–474, 1985.

CRAMP, S. (ed.). Birds of the Western Palearctic. Oxford: **Oxford University Press**, 1985. p. 87–100. ISBN 0-19-857507-6.

CULP, L. A. *et al*. Full annual cycle climate change vulnerability assessment for migratory birds. **Ecosphere**, v. 8, n. 3, e01565, 2017.

DA SILVEIRA, N. S. *et al*. Future climate change will impact the size and location of breeding and wintering areas of migratory thrushes in South America. **Ornithological Applications**, v. 123, n. 2, 2021.

DINGLE, H.; DRAKE, V. A. What is migration? **Bioscience**, v. 57, n. 2, p. 113-121, 2007.

DINGLE, H. Migration: the biology of life on the move. 2. ed. Oxford: **Oxford University Press**, 2014.

FISH, M. R. *et al*. Predicting the impact of sea-level rise on Caribbean sea turtle nesting habitat. **Conservation Biology**, v. 19, n. 2, p. 482–491, 2005.

FISHER, A. *et al*. Climatic niche model for overwintering monarch butterflies in a topographically complex region of California. **Insects**, v. 9, n. 4, p. 167, 2018.

FITTER, A. H., FITTER, R. S. R. **Science**, 296, 1689–1691. 2002.

FOX, J. W. *et al*. Climate change and the breeding ecology of migratory birds in North America. **Ecology and Evolution**, v. 6, n. 8, p. 2435-2444, 2016.

FRYXELL, J. M.; SINCLAIR, A. R. E. Causes and consequences of migration by large herbivores. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 3, n. 9, p. 237-241, 1988.

GASTON, A. J. The ecology of the seabirds of eastern Arctic Canada: population, biology, and feeding ecology. Ottawa: **Canadian Wildlife Service**, 2003.

GICQUEL, M. *et al*. Climate change does not decouple interactions between a central-place-foraging predator and its migratory prey. **Ecosphere**, v. 13, 2022.

GIENAPP, P.; LEIMU, R.; MERILÄ, J. Responses to climate change in avian migration time - microevolution versus phenotypic plasticity. **Climate Research**, v. 35, p. 25–35, 2007.

GINN, H. B.; MELVILLE, D. S. Wild bird populations: Their ecology and conservation. Cambridge: **Cambridge University Press**, 1983.

GODLEY, B. J. *et al*. Temperature dependent sex determination of Ascension Island green turtles. **Marine Ecology Progress Series**, v. 226, p. 115–124, 2002.

GREENBERG, R.; MARRA, P. P. Birds of two worlds: the ecology and evolution of migration. Baltimore: **Johns Hopkins University Press**, 2005.

HAZEN, E. L. *et al*. The influence of climate on migratory birds: A global perspective. **Global Change Biology**, v. 19, n. 7, p. 2096-2106, 2013.

HEDENSTRÖM, A. *et al*. Migration speed and scheduling of annual events by migrating birds in relation to climate change. **Climate Research**, v. 35, n. 1-2, p. 79-91, 2007.

HOLLAND, J. D. The influence of climate on the migration of birds: patterns and processes. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 4, n. 8, p. 143-157, 2006.

HOWARD, C., *et al*. Flight range, fuel load and the impact of climate change on the journeys of migrant birds. Proceedings of the Royal Society B: **Biological Sciences**, 285, 20172329. 2018.

HOWARD, C. *et al*. Disentangling the relative roles of climate and land cover change in driving the long-term population trends of European migratory birds. **Diversity and Distributions**, 2020.

HÜPPOP, O.; WINKEL, W. Climate change and timing of spring migration in the long-distance migrant Ficedula hypoleuca in central Europe: the role of spatially different temperature changes along migration routes. **Journal of Ornithology**, v. 147, n. 2, p. 344–353, 2006.

IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: **Cambridge University Press**, 2001.

IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: **Cambridge University Press**. 2013.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report - Summary for Policymakers. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**, 2014.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: **Cambridge University Press**, 2021.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Technical Summary. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**, 2022.

JENNI, L.; KERY, M. Timing of autumn bird migration under climate change: advances in long-distance migrants, delays in short-distance migrants. Proceedings of the Royal Society B: **Biological Sciences**, v. 270, n. 1523, p. 1467–1471, 2003.

JOLY, K. *et al*. Longest terrestrial migrations and movements around the world. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 2019.

KACZENSKY, P. *et al*. Connectivity of the Asiatic wild ass population in the Mongolian Gobi. **Biological Conservation**, v. 144, p. 920-929, 2011.

KUEMMERLE, T. *et al*. Potential impacts of oil and gas development and climate change on migratory reindeer calving grounds across the Russian Arctic. **Diversity and Distributions**, v. 20, n. 4, p. 416–429, 2014.

LA SORTE, F. A. *et al*. Projected changes in wind assistance under climate change for nocturnally migrating bird populations. **Global Change Biology**, 2018.

LAAKSONEN, S. *et al*. Climate change promotes the emergence of serious disease outbreaks of filarioid nematodes. **EcoHealth** 7: 7-13. 2010

LAMERIS, T. K. *et al*. Arctic geese tune migration to a warming climate but still suffer from a phenological mismatch. **Current Biology**, v. 28, n. 15, p. 2467–2473.e4, 2018.

LEBLOND, M.; ST-LAURENT, M.-H.; CÔTÉ, S. D. Caribou, water, and ice – fine-scale movements of a migratory arctic ungulate in the context of climate change. **Movement Ecology**, v. 4, n. 1, 2016.

LEMOINE, N.; SCHAEFER, H.-C.; BÖHNING-GAESE, K. Species richness of migratory birds is influenced by global climate change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 16, n. 1, p. 55–64, 2007.

LEZAMA-OCHOA, N. *et al*. Divergent responses of highly migratory species to climate change in the California Current. **Diversity and Distributions**, v. 30, e. 2, 2023.

LIANG, J. *et al*. Impacts of changing climate on the distribution of migratory birds in China: Habitat change and population centroid shift. **Ecological Indicators**, 2021.

LIEDVOGEL, M. The genetics of migration in birds: from genes to behaviour. **Journal of Ornithology**, v. 152, n. 1, p. 1-15, 2011.

LINDBLACH, K. Global warming and its effects on migratory patterns. **Journal of Ecological Studies**, v. 35, p. 45-56, 2000.

LYON, B. E. Climate change and the evolutionary ecology of migration in birds. **Nature Reviews Ecology & Evolution**, v. 1, p. 196-205, 2004.

MACMAHON, J. A.; MAYS, G. J. Climate change and the migration of species: a global overview. **Global Ecology and Biogeography**, v. 15, n. 4, p. 456-469, 2006.

MAGNUSON, J. J., *et al*. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. **Science**, 289(5485), 1743–1746. 2000.

MAHLI, Y.; WRIGHT, A. J. The effects of climate change on migratory patterns in the Arctic. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 1261-1274, 2004.

MARTINS, E. G. *et al*. Effects of river temperature and climate warming on stock-specific survival of adult migrating Fraser River sockeye salmon (Oncorhynchus nerka). **Global Change Biology**, v. 17, n. 1, p. 99–114, 2010.

MCCARTY, J. P. Ecological consequences of recent climate change. **Conservation Biology**, v. 15, n. 3, p. 650-660, 2001.

MENZEL, A., FABRIAN, P. **Nature**, 397, 659. 1999.

MILES, W. T. S. *et al*. Quantifying full phenological event distributions reveals simultaneous advances, temporal stability and delays in spring and autumn migration timing in long-distance migratory birds. **Global Change Biology**, 23, 1400–1414. 2017.

MILLER-RUSHING, A. J. *et al*. Bird migration times, climate change, and changing population sizes. **Global Change Biology**, v. 14, n. 9, p. 1959–1972, 2008.

MØLLER, A. P.; RUBOLINI, D.; LEHIKOINEN, E. Populations of migratory bird species that did not show a phenological response to climate change are declining. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 42, p. 16195–16200, 2008.

MØLLER, A. P. *et al*. Migration, moult and climate change in barn swallows Hirundo rustica in South Africa. **Climate Research**, v. 47, n. 3, p. 201-205, 2011.

MORTEN, J. M. *et al*. Global warming and arctic terns: Estimating climate change impacts on the world's longest migration. **Global Change Biology**, v. 29, n. 19, p. 5596-5614, 2023.

MUHLING, B. A. *et al*. Past, ongoing and future research on climate change impacts on tuna and billfishes in the western Atlantic. **Collective Volume of Scientific Papers**, ICCAT 71 (4), 1716-1727, 2015.

MYNENI, R. B. *et al*. The influence of vegetation on global climate. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 19, p. 2443-2446, 1997.

NEWTON, I. The migration ecology of birds. London: **Academic Press**, 2008.

OBERHAUSER, K. S.; PETERSON, A. T. Modelling current and future potential wintering distributions of eastern North American monarch butterflies. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 100, p. 14.063-14.068, 2003.

O'DEA, R. E.; NOBLE, D. W. A.; SINITIERE, A. A.; TIERNEY, B. T.; WARD-FEAR, G.; COX, R. M.; DOUGLAS, T.; NAGY, Z. T.; WHITING, M. J.; DOWNS, C. J.; LOUGHEED, S. C. Towards an integrative understanding of global patterns in body size evolution in squamate reptiles. **Nature Communications**, v. 12, p. 1-14, 2021.

OPDAL, A. F.; VIKEBO, F. B.; FIKSEN, O. Parental migration, climate and thermal exposure of larvae: spawning in southern regions gives Northeast Arctic cod a warm start. **Marine Ecology Progress Series**, 439, 255-262, 2011.

ORELLANA-MACÍAS, J. M. *et al*. Shifts in crane migration phenology associated with climate change in southwestern Europe. **Avian Conservation and Ecology**, v. 15, n. 1, 2020.

OWENS, M.; OWENS, D. Fences of death. **Wildlife**, v. 214, p. 214-217, 1980.

PARMESAN, C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 37, n. 1, p. 637-669, 2006.

PEER, A. C.; MILLER, T. J. Climate Change, Migration Phenology, and Fisheries Management Interact with Unanticipated Consequences. **North American Journal of Fisheries Management**, v. 34, n. 1, p. 94–110, 2014.

PETSAS, P. *et al*. Climate change on sea currents is not expected to alter contemporary migration routes of loggerhead sea turtles. **Ecological Modelling**, 475, 110220, 2023.

PROJETO TAMAR. Evolução das tartarugas marinhas. Disponível em: https://tamar.org.br/interna.php?cod=82. Acesso em 12 jun. 2024.

PUTMAN, N. Marine migrations. **Current Biology**, v. 28, n. 17, p. R972–R976, 2018.

REMPEL, R. S.; HORNSETH, M. L. Binational climate change vulnerability assessment of migratory birds in the Great Lakes Basins: tools and impediments. **PLOS ONE**, v. 12, n. 2, e0172668, 2017.

ROBINSON, R. A.; CRICK, H. Q. P.; LEARMOUTH, J. A.; MACLEAN, I. M. D.; THOMAS, C. D. Birds and Climate Change: Impacts and Conservation Responses. **Birdlife International**, 2009.

ROBINSON, R. *et al*. Travelling through a warming world: climate change and migratory species. **Endangered Species Research**, v. 7, p. 87–99, 2009.

ROSHIER, D. A.; REID, J. R. W. On animal distributions in dynamic landscapes. **Ecography**, v. 29, n. 1, p. 165-180, 2006.

RUBOLINI, D.; VISSER, M. E.; HUSSEL, M.; KROON, H. Climate change and the timing of bird migration: an experimental approach. **Oecologia**, v. 145, n. 4, p. 616-623, 2005.

SAINO, N. *et al*. Climate change effects on migration phenology may mismatch brood parasitic cuckoos and their hosts. **Biology Letters**, v. 5, n. 4, p. 539–541, 2009.

SALVADEO, C. J. *et al*. The effect of climate variability on gray whales (Eschrichtius robustus) within their wintering areas. **PLOS ONE**, v. 10, n. 8, p. e0134655, 2015.

SCHAEFER, H.-C.; JETZ, W.; BÖHNING-GAESE, K. Impact of climate change on migratory birds: community reassembly versus adaptation. **Global Ecology and Biogeography**, 2007.

SHARMA, S.; COUTURIER, S.; CÔTÉ, S. D. Impacts of climate change on the seasonal distribution of migratory caribou. **Global Change Biology**, v. 15, n. 10, p. 2549–2562, 2009.

SHERLEY, R. B. *et al*. Metapopulation tracking juvenile penguins reveals an ecosystem-wide ecological trap. **Current Biology**, v. 27, p. 563–568, 2017.

SINCLAIR, A. R. E. The functional role of large herbivores in ecosystems. **Ecosystem Management**, v. 35, n. 4, p. 123-134, 1995.

SISSENER, E. H.; BJØRNDAL, T. Climate change and the migratory pattern for Norwegian spring-spawning herring—implications for management. **Marine Policy**, v. 29, n. 4, p. 299–309, 2005.

SOMVEILLE, M. *et al*. Projected migrations of southern Indian Ocean albatrosses as a response to climate change. **Ecography**. 2020.

SOUTHWOOD, T. R. E. Ecological methods: with particular reference to the study of insect populations. London: **Chapman and Hall**, 1981.

SPARKS, T. H. *et al*. Increased migration of Lepidoptera linked to climate change. **European Journal of Entomology**, 104 (1), 139-143, 2007.

SPOTTISWOOD, C. N.; TOTTRUP, A. P.; COPPACK, T. Sexual selection predicts advancement of avian spring migration in response to climate change. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 273, n. 1605, p. 3023–3029, 2006.

SRYGLEY, R. B. *et al*. El Niño and dry season rainfall influence hostplant phenology and an annual butterfly migration from Neotropical wet to dry forests. **Global Change Biology**, v. 16, n. 3, p. 936–945, 2010.

SRYGLE, R. B. *et al*. El Niño, host plant growth, and migratory butterfly abundance in a changing climate. **Biotropica**, v. 46, n. 1, p. 90–97, 2013.

TAMAR. Avaliação do estado de conservação da tartaruga marinha Caretta caretta Linnaeus, 1758 no Brasil. [S.l.]: Projeto TAMAR, 2011. Disponível em: https://tamar.org.br/publicacoes_html/pdf/2011/2011_avaliacao_caretta.pdf. Acesso em: 12 jun. 2024.

VAN BUSKIRK, J., MULVIHILL, R. S., LEBERMAN, R. C. Variable shifts in spring and autumn migration phenology in North American songbirds associated with climate change. **Global Change Biology**, 15, 760–771. 2009.

VÉGVÁRI, Z.; BÓKONY, V.; BARTA, Z.; KOVÁCS, G. Life history predicts advancement of avian spring migration in response to climate change. **Global Change Biology**, v. 16, n. 1, p. 1–11, 2010.

VIGFUSDOTTIR, F. **Drivers of productivity in a subarctic seabird: Arctic Terns in Iceland**. 2012. Dissertation (PhD) – University of East Anglia, 2012.

VIGFUSDOTTIR, F.; GUNNARSSON, T. G.; GILL, J. A. Annual and between-colony variation in productivity of Arctic Terns in West Iceland. **Bird Study**, v. 60, n. 3, p. 289-297, 2013.

VISSER, M. E.; BOTH, C. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 272, n. 1581, p. 2561-2569, 2005.

VISSER, M. E. Keeping up with a warming world; assessing the phenological response of species to climate change. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 273, n. 1588, p. 823-835, 2006.

VISSER, M. E. *et al*. Climate change leads to decreasing bird migration distances. **Global Change Biology**, v. 15, n. 8, p. 1859–1865, 2009.

WALLACE, B. P. *et al*. Impacts of fisheries bycatch on marine turtle populations worldwide: toward conservation and research priorities. **Ecosphere**, v. 4, p. 1-19, 2013.