

# Mapeamento de áreas prioritárias para mitigar o risco de eletrocussão em espécies de aves com distribuição geográfica restrita.

## CONTEXTUALIZAÇÃO

O avanço do desenvolvimento humano e a crescente demanda por energia têm impulsionado a expansão das redes elétricas em escala global. Até 2040, estima-se que mais de 80 milhões de quilômetros de linhas de energia precisem ser instalados ou modernizados (IEA, 2023), o que pode gerar impactos significativos sobre a biodiversidade, especialmente por meio de colisões e eletrocussões de aves (Biasotto & Kindel 2018).

A eletrocussão em linhas de baixa e média tensão representa uma ameaça significativa à biodiversidade, afetando diversas espécies. Para algumas aves, como a águia-de-bonelli (*Aquila fasciata*), poucos eventos de eletrocussão podem comprometer populações locais (Hernández-Matías et al., 2015). Além dos impactos ecológicos, as eletrocussões podem acarretar custos econômicos expressivos, incluindo interrupções no fornecimento de energia, danos à infraestrutura e até incêndios florestais (Barnes et al., 2022; Guil et al., 2018). Portanto, identificar áreas com maior probabilidade de ocorrência de eletrocussões é fundamental não apenas para a conservação da fauna silvestre, mas também para reduzir prejuízos econômicos.

A eletroplessão ocorre quando as aves tocam simultaneamente condutores de diferentes fases ou estruturas aterradas, sendo as espécies de maior envergadura as mais afetadas (Bevanger, 1998). Entretanto, fatores como o tipo de poste, o comportamento e o uso de estruturas para pouso e nidificação também influenciam o risco. Psitacídeos, por exemplo, são particularmente vulneráveis devido à sua tendência a utilizar torres e postes para descanso e interação social.

**Resumo expandido do estudo publicado pela revista *Journal of Applied Ecology***

Biasotto, L. D., Kindel, A., Pacífico, E. C., Filadelfo, T., Paschotto, F. R., Favoretto, G. R., Sousa, A. E. E. A., Scariot, A., & Ascensão, F. (2025). Mapping priority areas to mitigate the risk of electrocution of range-restricted bird species. *Journal of Applied Ecology*, 62, 2787–2799. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70133>

Medidas de mitigação eficazes requerem a identificação das áreas com maior probabilidade de ocorrência de eletrocussões. No entanto, essa tarefa é dificultada quando há escassez de dados em regiões remotas e devido à subnotificação de fatalidades. A escassez de informações sobre eventos de eletrocussão dificulta a ação dos tomadores de decisão e limita a identificação de áreas de alto risco, onde ações de mitigação seriam mais eficazes. Essa lacuna de dados é particularmente crítica para espécies ameaçadas e regiões pouco estudadas, tornando essencial o desenvolvimento de modelos preditivos capazes de indicar onde as eletrocussões são mais prováveis de ocorrer.

Para superar essas limitações, propõe-se aqui um modelo preditivo de risco de eletrocussão que combina informações sobre susceptibilidade (atividade e comportamento das espécies) e exposição (densidade de redes elétricas). O método é aplicado à arara-azul-de-lear (*Anodorhynchus leari*), espécie ameaçada de extinção, endêmica da Caatinga – Brasil e que frequentemente interage com postes de energia. O modelo integra dados sobre distribuição de palmeiras licuri (*Syagrus coronata*), locais de dormitório e registros de observação da espécie, resultando em um mapa de risco de eletrocussão validado por ocorrências de eletrocussões conhecidas. Além disso, uma análise de custo-benefício é executada para orientar a identificação e quantificação de postes da rede em que a mitigação teria maior eficácia.

O modelo foi estruturado em seis etapas e parte do princípio de que o risco de uma espécie ser afetada resulta da interação entre sua susceptibilidade (tempo de permanência e uso do espaço) e sua exposição (proximidade e densidade das estruturas elétricas).

## ABORDAGEM GERAL UTILIZADA

Nossa região de estudo abrange a área da região do Raso da Catarina no bioma Caatinga, que abriga a maior população da arara-azul-de-lear. Atualmente, estima-se que a população tenha aproximadamente apenas 2500 indivíduos.

### ETAPA 1 – Seleção da espécie focal:

Escolheu-se a arara-azul-de-lear (*Anodorhynchus leari*) como espécie modelo, por apresentar interações com as linhas de energia e registros frequentes de fatalidades.

## ETAPA 2 – Definição da área potencial de atividade - susceptibilidade:

Considerando que a atividade da espécie está fortemente associada à distribuição do licuri (*Syagrus coronata*), principal recurso alimentar da espécie, e à proximidade de dormitórios conhecidos, foi gerado um mapa com as áreas de potenciais atividades dentro de um raio de 65km do dormitórios. Esse mapa foi elaborado a partir de registros de observação, da localização de dormitórios e das distâncias máximas de deslocamento conhecidas, representando a suscetibilidade espacial da espécie.

## ETAPA 3 – Mapeamento da exposição:

A densidade de postes de energia elétrica e número de fases de cada poste foram mapeados em toda a área de estudo, e utilizados como variável de exposição ao risco de eletrocussão.

## ETAPA 4 – Cálculo do risco potencial de eletrocussão:

As camadas de suscetibilidade (atividade potencial) e exposição (densidade de fases) foram sobrepostas, resultando em um mapa de risco potencial de eletrocussão para a arara-azul-de-lear.

## ETAPA 5 – Validação do modelo:

O modelo foi validado utilizando registros oportunísticos de eletrocussões da espécie em diferentes locais da área de estudo. Essa etapa permitiu avaliar a correspondência entre as áreas preditas como de alto risco e as ocorrências observadas.

## ETAPA 6 – Análise de custo-benefício:

Por fim, realizou-se uma análise de custo-benefício visando determinar o número de postes que precisariam de medidas de mitigação para alcançar diferentes níveis de redução de eventos de eletrocussão. Essa abordagem permitiu identificar um nível ótimo de mitigação, equilibrando eficiência para conservação da espécie e viabilidade econômica e logística.

## Resumo expandido do estudo publicado pela revista *Journal of Applied Ecology*

Biasotto, L. D., Kindel, A., Pacífico, E. C., Filadelfo, T., Paschotto, F. R., Favoretto, G. R., Sousa, A. E. E. A., Scariot, A., & Ascensão, F. (2025). Mapping priority areas to mitigate the risk of electrocution of range-restricted bird species. *Journal of Applied Ecology*, 62, 2787–2799. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70133>

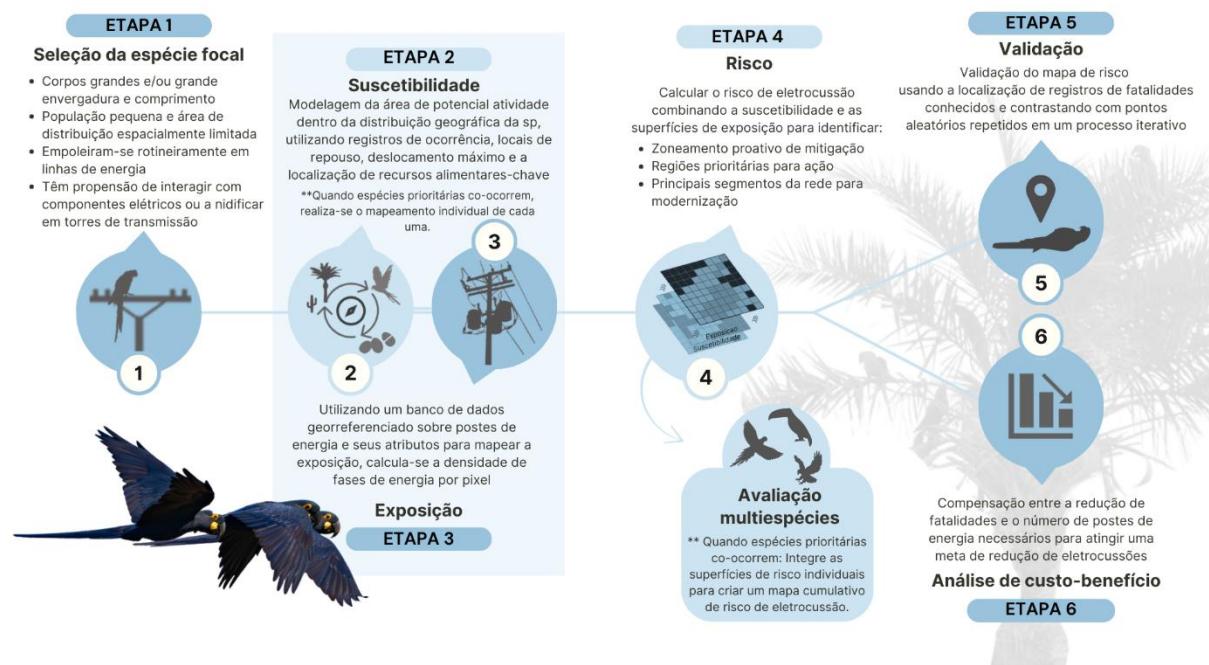


Figura 1 Fluxograma que ilustra a abordagem para identificar áreas prioritárias de mitigação para reduzir a eletrocussão de aves.

## RESULTADOS

### AREA DE POTENCIAL ATIVIDADE

A modelagem da área de potencial atividade indicou um alto ajuste entre o mapa resultante – suscetibilidade – e os pontos de presença utilizados para o teste de validação. Tanto a distância até as áreas de repouso/reprodução quanto a adequabilidade do licuri contribuíram consideravelmente para o modelo, sendo a primeira de forma mais substancial (85,5%) em comparação com a segunda (14,5%). Consequentemente, a região sul da área de estudo apresentou maior probabilidade de ocorrência de araras-de-lear e, portanto, de maior atividade.

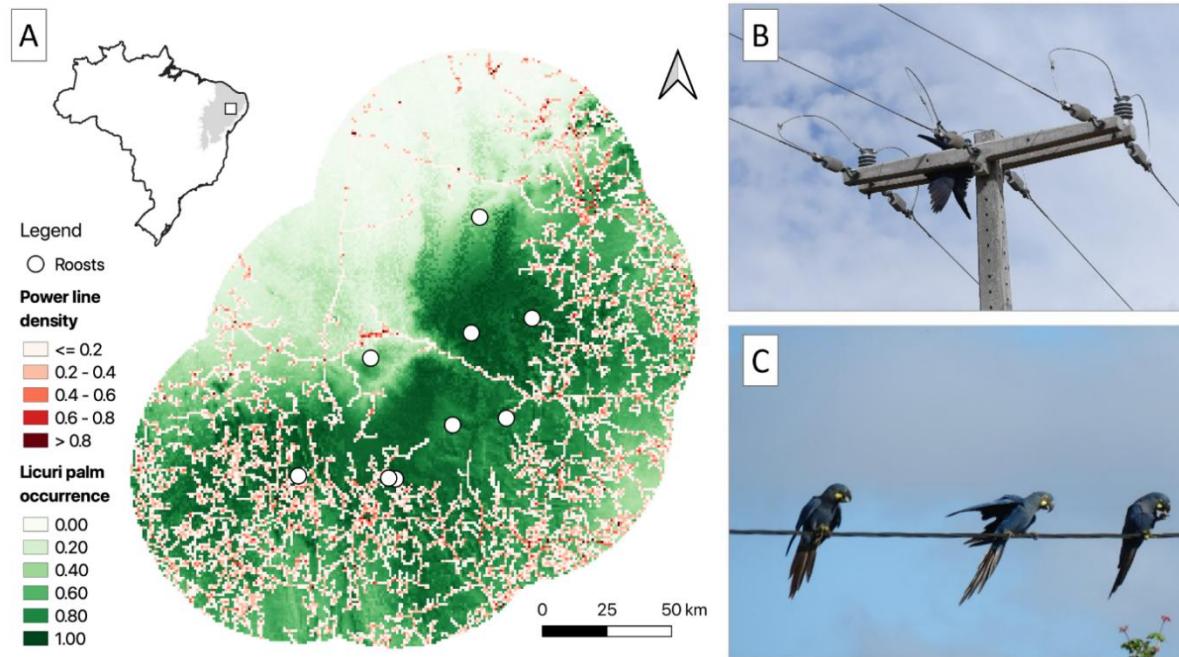


Figura 2 A) Localização da área de estudo onde avaliamos o risco de eletrocussão para a arara-azul-de-lear (*Anodorhynchus leari*), correspondente à região do Raso da Catarina (quadrado no detalhe) dentro da Caatinga brasileira (área cinza clara). Dentro da área de estudo, a imagem de fundo mostra a probabilidade de ocorrência da palmeira licuri (*Syagrus coronata*) (obtida de Lima et al., 2020) em um gradiente verde. A densidade de fase da linha de energia é mostrada em um gradiente vermelho sobreposta. Os círculos brancos representam os locais de repouso/reprodução da arara-azul-de-lear. B) Exemplo de um poste de média tensão (<13,8 kV) com um indivíduo de arara-azul-de-lear eletrocutado (© Thiago Filadelfo). C) Um grupo de araras-azuis-de-lear empoleiradas em cabos multiplexados enquanto se alimentam de frutos de palmeira licuri (© Mariana Diniz).

## RISCO DE ELETROCUSSÃO

A densidade de fases de energia variou de 0 a 279 fases por  $\text{km}^2$ . As seções central, norte e nordeste da área de estudo apresentaram menor número de linhas de média tensão. O mapa de risco variou entre 0 e 0,62, indicando que as áreas com maior densidade de postes não coincidiram necessariamente com as áreas de maior atividade (Fig. 3A). A validação revelou que a camada de risco fornece uma representação confiável da ocorrência de eletrocussões, ou seja, os locais de eletrocussões conhecidas ocorreram em áreas com valores de risco mais elevados (Fig. 3A). Essas áreas de maior risco podem ser priorizadas para a implementação de medidas de mitigação (Fig. 3B) e para a busca em campo dos postes mais problemáticos (por exemplo, Fig. 3C). Considerando as unidades de gestão jurisdicional, Euclides da Cunha apresentou o maior risco mediano de eletrocussão. No entanto, os valores de risco apresentaram variações consideráveis (Fig. 3 A e D).

### Resumo expandido do estudo publicado pela revista *Journal of Applied Ecology*

Biasotto, L. D., Kindel, A., Pacífico, E. C., Filadelfo, T., Paschotto, F. R., Favoretto, G. R., Sousa, A. E. E. A., Scariot, A., & Ascensão, F. (2025). Mapping priority areas to mitigate the risk of electrocution of range-restricted bird species. *Journal of Applied Ecology*, 62, 2787–2799. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70133>

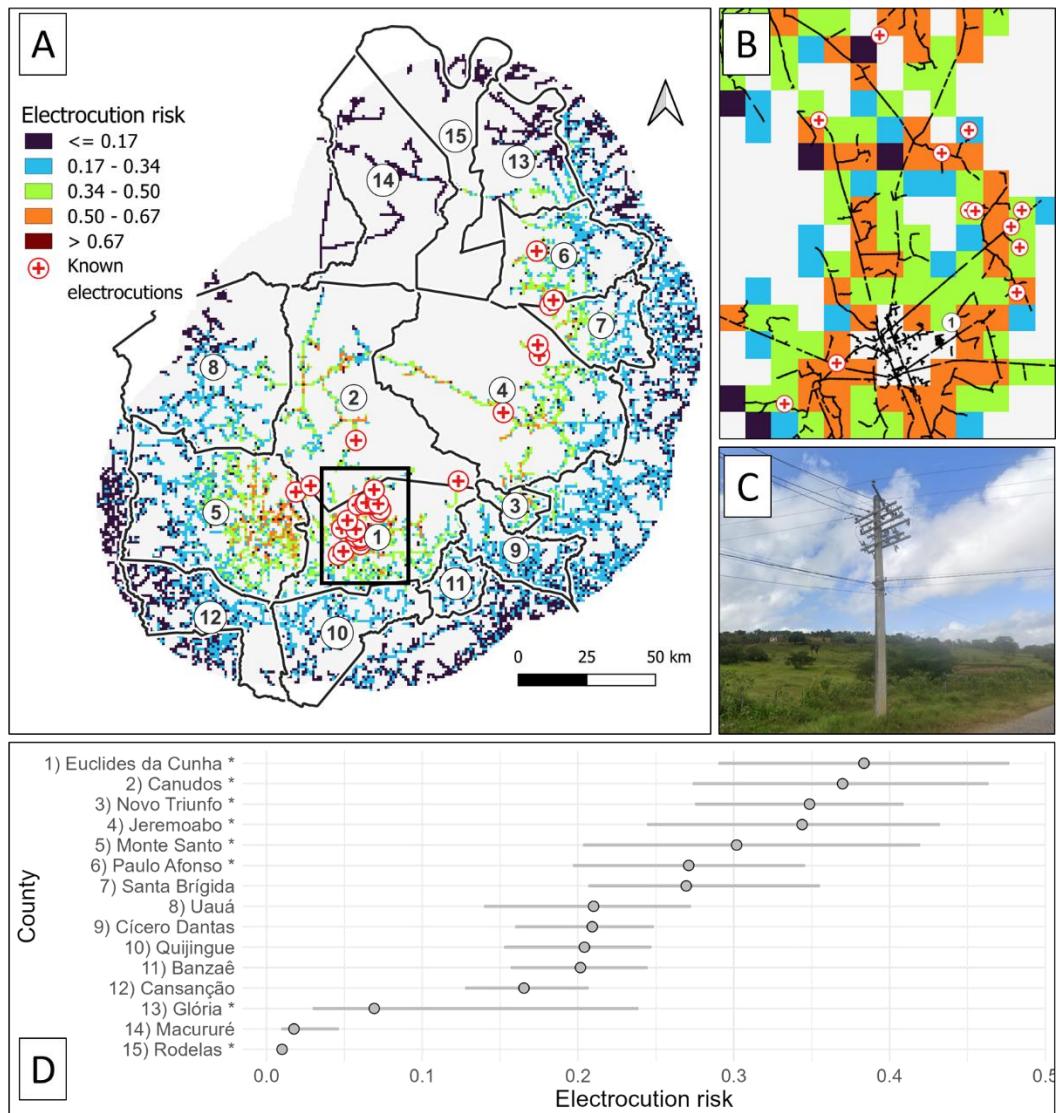


Figura 3. O painel A representa o risco de eletrocussão em toda a área de estudo (gradiente de cores), com pontos vermelhos indicando locais de fatalidades conhecidas e números identificando municípios. A avaliação destaca áreas de alto risco, como a região delimitada pelo retângulo preto, que é mostrada em detalhes no painel B (observe que os centros urbanos, identificáveis pela maior densidade de torres de alta tensão, foram removidos das análises). Essas regiões de alto risco podem orientar a identificação de torres prioritárias para modernização (por exemplo, painel C). Além disso, as informações de risco em nível de município fornecem aos tomadores de decisão informações valiosas para priorizar intervenções: no painel D, a mediana (pontos) e o intervalo interquartil de 25% a 75% (linhas) são resumidos para cada cidade (os números correspondem aos do painel A). Os asteriscos (\*) indicam os municípios onde a arara-azul-de-lear foi registrada.

## ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO

Nossa avaliação indicou que a mitigação do 1% das células de alto risco da rede elétrica poderia prevenir cerca de 35% das eletrocussões conhecidas, exigindo intervenção em pelo menos 5.668 postes de energia. Reconhecendo que isso pode não garantir a viabilidade futura da população, também avaliamos a mitigação dos 5% das células de maior risco, o que poderia prevenir cerca de 60% das eletrocussões conhecidas, abordando 22.037 torres (Fig. 4). A expansão dos esforços de mitigação para os 10% e 20% das células de maior risco poderia reduzir as eletrocussões conhecidas em mais de 80% e até 90%, respectivamente, exigindo a modernização de 37.412 e 63.966 torres (Fig. 4). Para a arara-azul-de-lear e seu reduzido tamanho populacional, a melhor medida de conservação seria reduzir a zero o número de eletrocussões.

Resumo expandido do estudo publicado pela revista *Journal of Applied Ecology*

Biasotto, L. D., Kindel, A., Pacífico, E. C., Filadelfo, T., Paschotto, F. R., Favoretto, G. R., Sousa, A. E. E. A., Scariot, A., & Ascensão, F. (2025). Mapping priority areas to mitigate the risk of electrocution of range-restricted bird species. *Journal of Applied Ecology*, 62, 2787-2799. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70133>

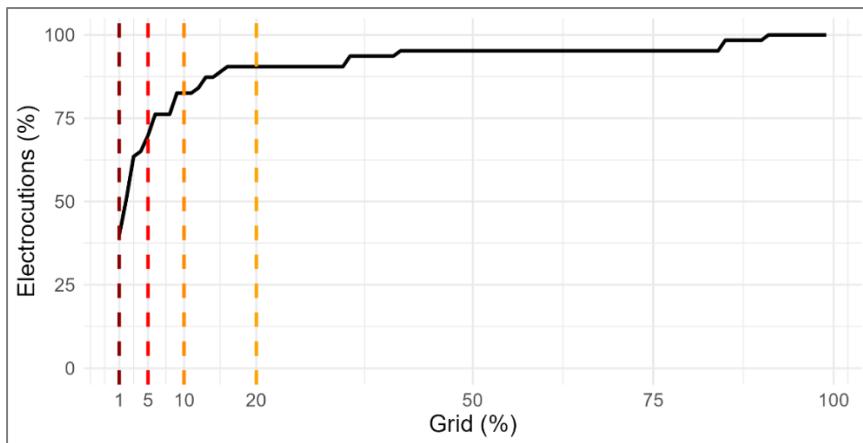


Figura 4. A avaliação de custo-benefício comparando a porcentagem da rede elétrica a ser mitigada com a respectiva redução potencial na porcentagem de eletrocussões conhecidas. 100% das células da rede avaliadas correspondem a 243.285 postes.

## RECOMENDAÇÕES

Neste estudo, propomos uma abordagem que requer relativamente limitados reduzidos para produzir uma avaliação inicial do risco de eletrocussão. Representa o primeiro exemplo de uma abordagem detalhada e, utilizando a arara-azul-de-lear como estudo de caso. Essa abordagem é particularmente relevante para países como o Brasil, onde a rede elétrica está se expandindo em ritmo acelerado. Por exemplo, as infraestruturas de energia em nossa área de estudo expandiu-se em 30% em apenas seis anos (2018–2023).

A área de estudo da arara-azul-de-lear situa-se na floresta tropical seca do nordeste do Brasil, uma das regiões semiáridas mais populosas do mundo, mas onde uma parcela significativa da população ainda não tem acesso à rede elétrica (Bezerra et al., 2022). Sem dúvida, o acesso à eletricidade deveria ser universal, portanto, a expansão da rede elétrica nessas localidades é extremamente necessária. Contudo, essa expansão deve ser precedida de um planejamento cuidadoso e sustentável, baseado no contexto e biodiversidade local.

## Resumo expandido do estudo publicado pela revista *Journal of Applied Ecology*

Biasotto, L. D., Kindel, A., Pacífico, E. C., Filadelfo, T., Paschotto, F. R., Favoretto, G. R., Sousa, A. E. E. A., Scariot, A., & Ascensão, F. (2025). Mapping priority areas to mitigate the risk of electrocution of range-restricted bird species. *Journal of Applied Ecology*, 62, 2787–2799. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70133>

Nosso método permite a transição de avaliações em larga escala que identificam espécies prioritárias (ver Biasotto et al., 2021) e riscos gerais de eletrocussão para um planejamento de mitigação mais direcionado para uma unidade de gestão específica de interesse (por exemplo, área de distribuição da espécie, limites jurisdicionais, rede de distribuição de energia). As informações resultantes do mapa de risco podem ajudar a identificar áreas onde medidas de mitigação, como a modernização de postes, são mais urgentes. Ao focarmos nas seções mais perigosas da rede, podemos aumentar a relação custo-benefício, evitando a necessidade de abordar áreas maiores, porém menos críticas. Dessa forma, este estudo pode servir como um modelo para o zoneamento de mitigação proativa, fornecendo uma estrutura que pode ser adaptada para proteger outras espécies em risco de eletrocussão e contribuir para a conservação de suas populações.

O número de eletrocussões pode ser significativamente reduzido priorizando estrategicamente os esforços de mitigação. Nossa análise de custo-benefício sugere que a mitigação do 1% das células de rede de maior risco poderia prevenir apenas 35% das eletrocussões conhecidas, mitigando quase 5.668 postes de energia. A mitigação dos 5% de maior risco poderia implicar na prevenção de cerca de 60% das eletrocussões conhecidas - 22.037 postes. No entanto, com base no atual status de conservação da arara-azul-de-lear e em sua pequena população, estimada em menos de 2.600 indivíduos (PAN Aves da Caatinga, 2024), mesmo reduzindo 60% das fatalidades, as perdas restantes ainda poderiam ser relevantes para a população, não representando um benefício a longo prazo para a viabilidade da arara-azul-de-lear. Até que tenhamos uma análise de viabilidade populacional, uma redução de fatalidades próxima a 90%, que exigiria a mitigação de riscos em 10% a 20% dos postes, é um número mais cauteloso, assumindo que as vítimas conhecidas representam a distribuição atual de eletrocussões. No entanto, o número de torres que necessitam de mitigação chega a 37.412 (reabilitação de 10% das torres) e 63.966 (reabilitação de 20% das torres). É razoável supor que abordar toda essa extensão por meio de medidas de mitigação estruturais e permanentes não seria logicamente viável a curto prazo. Nossa estrutura de priorização pode, portanto, ajudar a orientar por onde começar a implementar ações de mitigação, garantindo que os esforços sejam direcionados primeiro para as áreas mais críticas. O mapa de risco de eletrocussão mostra um foco variável entre os diferentes municípios, com valores de risco geral mais elevados em toda a área de estudo. **Isso sugere que os esforços de mitigação devem ser**

**simultaneamente multifocais, abrangendo não apenas o município de Euclides da Cunha, que representa a maioria das fatalidades observadas (72%), mas também outros municípios.**

Por fim, utilizamos as melhores informações disponíveis sobre registros de eletrocussão de araras-de-lear, baseadas principalmente em relatos de moradores locais. Nossa conjunto de dados consistiu em 63 eventos fatais com incerteza espacial relativamente baixa (< 100 m). Todas as carcaças foram encontradas perto de postes de energia, e algumas interrupções no fornecimento de energia geralmente ocorreram pouco antes de os moradores descobrirem as carcaças. No entanto, muitas outras vítimas provavelmente nunca foram vistas, o que pode levar a um viés espacial na distribuição das eletrocussões em direção a áreas mais populosas. Além disso, animais carniceiros podem ter removido as carcaças antes que pudessem ser detectadas. Portanto, nosso conjunto de dados pode subestimar a distribuição e a intensidade reais das eletrocussões. Contudo, nossos procedimentos de validação independentes indicaram que os padrões espaciais do risco modelado e da eletrocussão atual se sobrepõem significativamente e, até que informações mais refinadas estejam disponíveis, medidas de mitigação devem ser implementadas imediatamente, sem hesitação.

Diversas medidas de mitigação foram propostas para reduzir os riscos de eletrocussão. Os métodos mais comuns incluem aumentar a distância entre componentes energizados para evitar o contato ou inverter a posição dos isoladores e jumpers (separação), cobrir partes energizadas ou aterradas com materiais isolantes resistentes (isolamento) e usar plataformas de pouso seguras ou dispositivos de dissuasão para direcionar as aves para longe de equipamentos perigosos (redirecionamento). Tão importante quanto a instalação de uma medida de mitigação é a sua manutenção adequada ao longo do tempo. Considerando algumas lacunas de conhecimento sobre como as eletrocussões ocorrem, nosso mapa é útil para informar as áreas prioritárias para o estudo desses eventos e o principal comportamento das espécies associado ao risco. Com poucas exceções, estudos sobre o comportamento de aves em postes são praticamente inexistentes (García-Alfonso et al., 2021), mas são fundamentais e devem ser sistematizados para orientar o tipo de mitigação que deve ser instalada.

#### **Resumo expandido do estudo publicado pela revista *Journal of Applied Ecology***

Biasotto, L. D., Kindel, A., Pacífico, E. C., Filadelfo, T., Paschotto, F. R., Favoretto, G. R., Sousa, A. E. E. A., Scariot, A., & Ascensão, F. (2025). Mapping priority areas to mitigate the risk of electrocution of range-restricted bird species. *Journal of Applied Ecology*, 62, 2787–2799. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70133>

Outras espécies que se empoleiram em postes também poderiam ser beneficiadas por essa abordagem. Veja exemplos recentes de eletrocussões no Brasil: **águia-cinzenta; gavião-real; tuiuiu; araras-caninde**. Para cenários em que espécies com diferentes comportamentos alimentares e de uso do espaço coexistindo – não e o caso das reportagens acima – recomenda-se uma abordagem que combine múltiplas espécies, para que não sejam aplicados modelos individuais que corram o risco de gerar recomendações contraditórias. Nesses casos, o ideal é identificar áreas de consenso com o maior risco de eletrocussão, que possam gerar recomendações abrangentes de políticas de conservação para o processo de tomada de decisão sobre medidas de mitigação.

Em resumo, nossa abordagem permite identificar áreas com alta atividade de araras-de-lear que devem ser evitadas para novas instalações de linhas de distribuição ou equipadas com configurações seguras de postes e cabos desde o início (abordagem de mitigação proativa). Além disso, nosso mapa de risco de eletrocussão fornece um resultado para orientar as decisões sobre onde a modernização deve ser implementada para minimizar os riscos de eletrocussão de forma eficaz (abordagem de mitigação reativa). Nossos resultados confirmaram que áreas com maior potencial de atividade, particularmente aquelas mais próximas de locais de repouso e localizadas em regiões com maior probabilidade de presença da palmeira-licuri, tendem a apresentar maior incidência de eletrocussão. Esses resultados estão em consonância com pesquisas anteriores, que indicaram que a presença de locais de nidificação e a disponibilidade de alimento estão relacionadas à atividade das aves e à exposição à infraestrutura energética, devendo, portanto, ser priorizadas igualmente no planejamento de mitigação (Biasotto et al., 2022).

#### **Referências**

- Barnes, T. A., Dwyer, J. F., Mojica, E. K., Petersen, P. A., & Harness, R. E. (2022). Wildland fires ignited by avian electrocutions. *Wildlife Society Bulletin*, 46(3). <https://doi.org/10.1002/wsb.1302>
- Bevanger, K. (1998). Biological and conservation aspects of bird mortality caused by electricity power lines: a review. *Biological Conservation*, 86(1), 67–76. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(97\)00176-6](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(97)00176-6)
- Bezerra, P., Cruz, T., Mazzone, A., Lucena, A. F. P., De Cian, E., & Schaeffer, R. (2022). The multidimensionality of energy poverty in Brazil: A historical analysis. *Energy Policy*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113268>

Biasotto, L. D., & Kindel, A. (2018). Power lines and impacts on biodiversity: A systematic review. *Environmental Impact Assessment Review*, 71(April), 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.010>

Biasotto, L. D., Moreira, F., Bencke, G. A., D'Amico, M., Kindel, A., & Ascensão, F. (2021). Risk of bird electrocution in power lines: a framework for prioritizing species and areas for conservation and impact mitigation. *Animal Conservation*, 24(4), acv.12736. <https://doi.org/10.1111/acv.12736>

Biasotto, L. D., Pacífico, E. C., Paschotto, F. R., Filadelfo, T., Couto, M. B., Sousa, A. E. B. A., Mantovani, P., Silveira, L. F., Ascensão, F., Tella, J. L., & Kindel, A. (2022). Power line electrocution as an overlooked threat to Lear's Macaw (*Anodorhynchus leari*). *Ibis*, 165(3), 998–1006. <https://doi.org/10.1111/ibi.13139>

de Lima, V. V. F., Scariot, A., & Sevilha, A. C. (2020). Predicting the distribution of *Syagrus coronata* palm: Challenges for the conservation of an important resource in northeastern Brazil. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151607>

Guil, F., Soria, M. Á., Margalida, A., & Pérez-García, J. M. (2018). Wildfires as collateral effects of wildlife electrocution: An economic approach to the situation in Spain in recent years. *Science of The Total Environment*, 625(June), 460–469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.242>

Hernández-Lambráñ, R. E., Sánchez-Agudo, J. Á., & Carbonell, R. (2018). Where to start? Development of a spatial tool to prioritise retrofitting of power line poles that are dangerous to raptors. *Journal of Applied Ecology*, 55(6), 2685–2697. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13200>

International Energy Agency, I. (2023). World Energy Outlook 2023. [www.iea.org/terms](http://www.iea.org/terms)

ICMBIO No 1.546. (2024). Plano de Ação Nacional para Conservação das Aves da Caatinga - PAN Aves da Caatinga. [chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcgkclefindmkaj/https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/pan/pan-aves-da-caatinga/3-ciclo/20240522-pan-aves-caatinga-portaria.pdf](https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/pan/pan-aves-da-caatinga/3-ciclo/20240522-pan-aves-caatinga-portaria.pdf)

PAN Aves da Caatinga. (2024). Monitoramento Populacional arara-azul-de-lear. Relatorio.

#### Resumo expandido do estudo publicado pela revista *Journal of Applied Ecology*

Biasotto, L. D., Kindel, A., Pacífico, E. C., Filadelfo, T., Paschotto, F. R., Favoretto, G. R., Sousa, A. E. E. A., Scariot, A., & Ascensão, F. (2025). Mapping priority areas to mitigate the risk of electrocution of range-restricted bird species. *Journal of Applied Ecology*, 62, 2787–2799. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70133>