

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE**

Débora Lima Santos

**ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO DE BESOUROS ROLA-BOSTAS:
MODELOS, AMEAÇAS E PERSPECTIVAS**

Ilhéus/BA
03/2025

Débora Lima Santos

ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO DE BESOUROS ROLA-BOSTAS: MODELOS, AMEAÇAS E PERSPECTIVAS

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade da Universidade Estadual de Santa Cruz como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Ecologia e Conservação da Biodiversidade.

Discente: Débora Lima Santos

Orientador: Dr. Jacques Hubert Charles DELABIE

Coorientador: Dr. Elmo B.A. Koch

Coorientador: Dr. Cássio Alencar Nunes

Ilhéus/BA

03/2025



S237

Santos, Débora Lima.

Ecologia e conservação de besouros rola-bostas: modelos, ameaças e perspectivas / Débora Lima Santos. – Ilhéus, BA: UESC, 2025.

97f.: il.

Orientador: Jacques Hubert Charles Delabie
Tese (Doutorado) – Universidade Estadual
de Santa Cruz. Programa de Pós-Graduação em
Ecologia e Conservação da Biodiversidade –
PPGECB.

Inclui referências.

1. Biodiversidade – Conservação. 2. Besouros.
3. Coleoptera. 4. Resiliência (Ecologia). 5. Ecossis-
temas – Manejo. 6. Mata Atlântica. 7. Sul Baiano (BA: Mesorregião). I. Título.

CDD 333.950981

Débora Lima Santos

ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO DE BESOUROS ROLA-BOSTAS: MODELOS, AMEAÇAS E PERSPECTIVAS

Dra. Priscila Lopes

Universidade Estadual de Feira de Santana

Dr. Alexandre Arnhold

Universidade Federal do Sul da Bahia

Dr. Walisson Kenedy Siqueira

Universidade Federal de Minas Gerais

Dr. Wallace Beiroz

Universidade Federal da Paraíba

*A biologia é a arte de observar, admirar, compreender
e descrever a natureza.*



Ilustração: Me. Pedro Henrique de Oliveira Ribeiro, LABEC – UNB

<http://lattes.cnpq.br/1811510170228005>

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço à fonte criadora!

Agradeço à minha família, aos meus pais Eliel e Lurdinha que, em toda a sua simplicidade, me incentivaram a estudar! Meus pais têm o ensino fundamental 1 completo, antigo 3º e 4º série, e em meio às adversidades, conseguiram colocar as três filhas na Universidade Pública!

Agradeço às minhas irmãs Darkiela e Dayany que já toleraram muitos chiliques, ausências em épocas diversas e muito estresse. Agradeço pelo deboche, pela alegria e principalmente pelo apoio! Agradeço em especial ao meu pai, por todas as noites em claro que passou para que eu pudesse dormir, e quando essa banca acabar, eu vou lá dar um beijo e brindar com o meu garçom predileto no mundo!

Agradeço ao meu marido por todo companheirismo, apoio e incentivos diversos!

Agradeço à criança curiosa que fui e aos meus professores do ensino fundamental que despertaram em mim a vontade de estudar! Agradeço a todos os professores, até os que eu não compreendi, todos me ensinaram algo!

Agradeço às Gems, "**amigos da pandemia**", que acompanharam a novela desse doutorado em tempo real, sou grata por toda ajuda e principalmente pela companhia nessa jornada! Obrigada, Bunitahs!

Agradeço às "Jovens Senhoras P...", meninas, vocês tornam a caminhada mais alegre, vocês inspiram! Vocês foram fundamentais nessa caminhada, obrigada Lêda, Gleici, Vanessa e principalmente a Karol que compartilhou, além dos estresses, as glórias também! Agradeço a todas as girls que me auxiliaram: Taise (fotógrafa oficial), Zubaria e Vanessa!

Agradeço à Karol por tudo no campo, dos perrengues ao luxo, principalmente pelo campo =)

Agradeço aos doadores não tão anônimos pelas "iscas"!

Agradeço à comissão de orientação, e ao meu orientador Jacques por tudo, por me incentivar a continuar e terminar o doutorado, por me acalmar, por compartilhar dicas e principalmente pela paciência!

Agradeço à minha psicóloga, ela sabe os motivos! =)

Agradeço a todos os envolvidos que permitiram a realização da coleta de dados, aos responsáveis pela Reserva da Michelin, em especial ao Kevin Flesher por disponibilizar toda a infraestrutura da reserva para as coletas.

Agradeço ao Parque Nacional do Monte Pascoal, e à empresa Symbiosis Investimentos por

permitir e viabilizar as coletas nas dependências da empresa. Agradeço aos moradores da Fazenda Cachoeira da Serra – Pimenteira, por me acompanhar em campo, pela prosa boa, cafezinho e, claro, o mel de cacau.

Agradeço ao Laboratório de Mimercologia - CEPEC/CEPLAC por disponibilizar a infraestrutura física e tecnológica para todas as etapas de construção da tese. Agradeço à Universidade Estadual de Santa Cruz e ao pessoal do Laboratório de Artrópodes Sociais (LABAS) pelo empréstimo de equipamento e pela prosa!

Agradeço ao grupo de Coleóptera do Brasil, por me auxiliar na identificação das espécies;

Agradeço à CAPES pela concessão de bolsa (nº 88887.479012/2020-00);

Agradeço ao Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade SISBIO, por ter concedido a Licença (76824-3) para as coletas.

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUÇÃO GERAL.....	13
REFERÊNCIAS.....	15
CAPÍTULO 1	17
INTRODUCTION	18
METHODS.....	20
Literature review.....	20
Data extraction.....	20
RESULTS AND DISCUSSION	22
Chronology of publications	22
Geographical distribution of studies.....	23
South America and Brazil distribution of studies.....	24
Main dung beetle taxa recorded.....	26
Main effects of VMPs on dung beetles	27
Most commonly used veterinary medical drug	29
Final considerations and implications for further studies.....	30
REFERENCES.....	31
CAPÍTULO 2	41
INTRODUÇÃO	42
METODOLOGIA	44
Área de estudo	44
Coletas dos espécimes	45
Seleção dos Pontos Amostrais.....	46
Categorias de impacto antrópico	47
Cobertura de dossel	48
Amostragem da diversidade de besouros rola-bostas.....	48
Análise de dados.....	51
RESULTADOS	52

Riqueza de besouros rola-bostas.....	56
Abundância de besouros rola-bostas	58
Padrões de diversidade- β e estrutura das comunidades.....	58
DISCUSSÃO.....	62
REFERÊNCIAS.....	65
CAPÍTULO 3	76
INTRODUÇÃO	77
METODOLOGIA	79
Área de estudo	79
Dados de ocorrências de besouros rola-bostas	80
Dados climáticos.....	80
Modelos de nicho ecológico	81
Análise de dados.....	82
RESULTADOS.....	82
DISCUSSÃO.....	84
REFERÊNCIAS.....	87
CONCLUSÃO GERAL.....	97
MATERIAL SUPLEMENTAR	98

RESUMO

Os besouros rola-bostas (Coleoptera: Scarabaeinae) desempenham funções ecológicas essenciais, contribuindo para o funcionamento e a resiliência dos ecossistemas terrestres. A Mata Atlântica do sul da Bahia é uma região de elevada biodiversidade, abrigando muitas espécies endêmicas, algumas sob grave ameaça de extinção. No entanto, ainda há lacunas significativas no conhecimento sobre a ecologia e conservação desses organismos na região. Nesta tese, avaliamos os impactos das mudanças climáticas e do uso de produtos médico-veterinários na riqueza e funcionalidade das assembleias de besouros rola-bostas, considerando desde uma escala global até a Mata Atlântica do sul e extremo sul da Bahia, com o objetivo de propor estratégias de conservação e manejo sustentável. Especificamente, investigamos: (i) os efeitos do uso indiscriminado de fármacos médico-veterinários sobre besouros rola-bostas em nível global, com foco especial na América do Sul e no Brasil; e (ii) a composição das assembleias desses besouros em áreas com diferentes níveis de impacto antrópico no sul e extremo sul da Bahia, utilizando a lista de espécies amostradas para modelar a distribuição potencial futura do grupo sob cenários climáticos otimistas e pessimistas para 2050 e 2070. Os resultados indicam que os fármacos veterinários, especialmente as lactonas macrocíclicas, têm um impacto significativo sobre os besouros rola-bostas devido à toxicidade residual desses compostos. Na América do Sul, e particularmente no Brasil, os estudos sobre esses efeitos ainda são escassos, especialmente quando comparados à grande escala da atividade pecuária. Além disso, os dados reforçam a importância das áreas florestais menos antropizadas no sul da Bahia para a manutenção da diversidade e funcionalidade das assembleias de besouros rola-bostas. As projeções climáticas futuras para as 16 espécies amostradas sugerem que 81,25% delas perderão áreas adequadas, resultando em um declínio na riqueza de besouros, com destaque para a vulnerabilidade das espécies do gênero *Dichotomius* em cenários mais pessimistas. Diante desses achados, ressaltamos a necessidade de implementar boas práticas na administração de fármacos veterinários e a urgência da conservação das áreas florestais para garantir a manutenção dos besouros rola-bostas e dos serviços ecossistêmicos que prestam. A mitigação dos impactos antrópicos e climáticos sobre esses insetos engenheiros de ecossistemas é fundamental para preservar a biodiversidade e promover a sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Dung beetles (Coleoptera: Scarabaeinae) play essential ecological roles, contributing to the functioning and resilience of terrestrial ecosystems. The Atlantic Forest in southern Bahia is a region of high biodiversity, harboring many endemic species, some of which are under severe threat of extinction. However, significant gaps remain in our understanding of the ecology and conservation of these organisms in the region. In this thesis, we assess the impacts of climate change and the use of veterinary pharmaceuticals on the richness and functionality of dung beetle assemblages, considering a global scale down to the Atlantic Forest in southern and extreme southern Bahia, aiming to propose conservation strategies and sustainable management practices. Specifically, we investigate: (i) the current state and effects of indiscriminate veterinary drug use on dung beetles at a global level, with a special focus on South America and Brazil; and (ii) the composition of dung beetle assemblages in areas with different levels of anthropogenic impact in southern and extreme southern Bahia, using the sampled species list to model the group's potential future distribution under optimistic and pessimistic climate scenarios for 2050 and 2070. Our results indicate that veterinary pharmaceuticals, particularly macrocyclic lactones, have a significant impact on dung beetles due to the residual toxicity of these compounds. In South America, and especially in Brazil, studies on these effects remain scarce, particularly when compared to the large scale of livestock production. Additionally, our findings highlight the importance of less anthropized forest areas in southern Bahia for maintaining the diversity and functionality of dung beetle assemblages. Future climate projections for the 16 sampled species suggest that 81,25% will lose suitable areas, leading to a decline in dung beetle richness, with species of the genus *Dichotomius* being particularly vulnerable under pessimistic scenarios. Given these findings, we emphasize the need to implement best practices in veterinary drug administration and the urgency of conserving forest areas to ensure the persistence of dung beetles and the ecosystem services they provide. Mitigating anthropogenic and climate impacts on these ecosystem engineer insects is essential for preserving biodiversity and promoting environmental sustainability.

INTRODUÇÃO GERAL

Os insetos desempenham papéis fundamentais nos ecossistemas terrestres, sendo responsáveis por processos como a polinização, decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (Cardoso et al., 2020). No entanto, as populações de insetos têm sofrido declínios significativos devido a fatores como mudanças climáticas, perda de habitat e poluição química, ameaçando não apenas a biodiversidade, mas também os serviços ecossistêmicos essenciais que esses organismos prestam (Outhwaite et al., 2022). Estima-se que até 66% das espécies de insetos podem perder áreas adequadas para sua sobrevivência até o final do século (Wiens & Zelinka, 2024).

Dentre os insetos, os besouros rola-bostas (Coleoptera: Scarabaeinae) se destacam por sua importância ecológica. Eles promovem a decomposição do esterco, a fertilização do solo, a dispersão secundária de sementes e o controle de parasitas, influenciando diretamente a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas terrestres (Nichols et al., 2008). Devido à sua sensibilidade às alterações ambientais, esses besouros são amplamente utilizados como bioindicadores da qualidade do habitat (Bogoni et al., 2019). No entanto, diferentes pressões antrópicas, como o desmatamento, o uso indiscriminado de fármacos médico-veterinários e as mudanças climáticas, ameaçam a diversidade e funcionalidade dessas assembleias (Verdú et al., 2018; Junco et al., 2021).

Na América do Sul, e particularmente no Brasil, os besouros rola-bostas enfrentam desafios adicionais decorrentes da intensa modificação do uso da terra. O Brasil abriga uma das maiores diversidades de besouros rola-bostas do mundo, com aproximadamente 786 espécies descritas (CTFB, 2024), mas a conversão de florestas para atividades agropecuárias tem fragmentado habitats e reduzido a riqueza desses insetos em diversas regiões (Bogoni et al., 2019). Além disso, a pecuária extensiva faz uso frequente de fármacos veterinários, como as lactonas macrocíclicas (ivermectina, doramectina, abamectina e moxidectina), que são eliminados nas excretas dos animais e afetam diretamente os besouros coprófagos. Esses compostos possuem elevada toxicidade residual, interferindo na reprodução, na sobrevivência e na atividade decompositora desses besouros (Verdú et al., 2018; Junco et al., 2021). Apesar da relevância desse problema, a maioria dos estudos sobre os impactos dessas substâncias foi realizada em países do hemisfério norte, e há uma lacuna de conhecimento sobre seus efeitos na América do Sul, especialmente no Brasil (Buijs et al., 2022).

A Mata Atlântica do sul e extremo sul da Bahia se destaca como uma região prioritária para a conservação da biodiversidade. Esse bioma abriga uma alta diversidade de espécies, muitas delas endêmicas, e desempenha um papel essencial na regulação climática e no fornecimento de serviços ecossistêmicos (Joly et al., 2014; Rezende et al., 2018). No entanto, o avanço da agropecuária, a fragmentação florestal e o uso intensivo de produtos químicos na pecuária têm alterado a dinâmica ecológica local, impactando diretamente a fauna de besouros rola-bostas (Souza et al., 2020; Reis et al., 2023). Estudos indicam que ambientes mais preservados sustentam maior riqueza e diversidade funcional desses insetos, enquanto áreas antropizadas apresentam assembleias empobrecidas (Souza et al., 2020).

Além da degradação do habitat, as mudanças climáticas representam outra ameaça significativa para os besouros rola-bostas da região. Modelos preditivos sugerem que o aumento das temperaturas e as alterações nos padrões de precipitação podem reduzir drasticamente as áreas adequadas para muitas espécies, afetando sua distribuição e viabilidade populacional (IPCC, 2022). Diante desse cenário, é essencial compreender como esses fatores interagem para embasar estratégias eficazes de conservação. Diante desse contexto, esta tese tem como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas e do uso de produtos médico-veterinários na riqueza e funcionalidade das assembleias de besouros rola-bostas, desde uma escala global até a Mata Atlântica do sul e extremo sul da Bahia. Para isso, investigamos: (i) os efeitos do uso indiscriminado de fármacos médico-veterinários sobre besouros rola-bostas em nível global, com foco especial na América do Sul e no Brasil; (ii) a composição das assembleias de besouros rola-bostas em ambientes do sul e extremo sul da Bahia com diferentes níveis de impacto antrópico, além da modelagem preditiva da distribuição futura dessas espécies sob cenários climáticos otimistas e pessimistas para 2050 e 2070.

A tese está estruturada em dois capítulos interligados. O primeiro capítulo realiza uma revisão da literatura sobre os impactos dos fármacos médico-veterinários nos besouros rola-bostas, identificando lacunas no conhecimento e propondo diretrizes para manejo sustentável. O segundo capítulo investiga a composição das assembleias de besouros rola-bostas no sul e extremo sul da Bahia, avaliando como diferentes níveis de impacto antrópico influenciam a composição dessas assembleias. Além disso, modelamos a distribuição futura das espécies amostradas na região para avaliar os impactos potenciais das mudanças climáticas em sua persistência.

Os resultados desta pesquisa fornecerão informações essenciais para a conservação das assembleias de besouros rola-bostas e dos serviços ecossistêmicos que prestam. Além disso, destacam a necessidade de implementação de estratégias de manejo sustentável, como a preservação de áreas florestais e a regulamentação do uso de fármacos veterinários, para mitigar os impactos das mudanças ambientais e garantir a resiliência desses importantes engenheiros do ecossistema.

REFERÊNCIAS

- Bogoni, J. A., da Silva, P. G., & Peres, C. A. (2019). Co-declining mammal–dung beetle faunas throughout the Atlantic Forest biome of South America. *Ecography*, 42(11), 1803–1818. <https://doi.org/10.1111/ecog.04670>
- Buijs, J., Ragas, A., & Mantingh, M. (2022). Presence of pesticides and biocides at Dutch cattle farms participating in bird protection programs and potential impacts on entomofauna. *Science of The Total Environment*, 838, 156378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156378>
- Cardoso, P., Barton, P. S., Birkhofer, K., Chichorro, F., Deacon, C., Fartmann, T., et al. (2020). Scientists’ warning to humanity on insect extinctions. *Biological Conservation*, 242, 108426. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108426>
- CTFB (2024). Lista de Espécies da Fauna do Brasil. Disponível em: <http://fauna.jbrj.gov.br/fauna/listaBrasil/PrincipalUC/PrincipalUC.do?lingua=pt> (Acessado em 20 de maio de 2024)
- IPCC (2022). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>
- Joly, C. A., Metzger, J. P., & Tabarelli, M. (2014). Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. *New Phytologist*, 204(3), 459–473. <https://doi.org/10.1111/nph.12989>
- Junco, M., Iglesias, L. E., Sagués, M. F., Guerrero, I., Zegbi, S., & Saumell, C. A. (2021). Effect of macrocyclic lactones on nontarget coprophilic organisms: a review. *Parasitology Research*, 120(3), 773–783. <https://doi.org/10.1007/s00436-021-07064-4>

- Nichols, E., Spector, S., Louzada, J., Larsen, T., Amezquita, S., & Favila, M. E. (2008). Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. *Biological Conservation*, 141(6), 1461–1474. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.04.011>
- Outhwaite, C. L., McCann, P., & Newbold, T. (2022). Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide. *Nature*, 605, 97–102. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04644-x>
- Reis, C., Zarucki, M., Delabie, J., & Escobar, F. (2023). Biodiversity impacts of land use simplification: a case study of dung beetles in a landscape of the Brazilian Atlantic Forest. *International Journal of Tropical Insect Science*, 43, 2045–2056. <https://doi.org/10.1007/s42690-023-01106-3>
- Rezende, C. L., Scarano, F. R., Assad, E. D., Joly, C. A., Metzger, J. P., Strassburg, B. B. N., et al. (2018). From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 16(4), 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>
- Souza, R. B., & Guimarães, J. R. (2022). Effects of Avermectins on the Environment Based on Its Toxicity to Plants and Soil Invertebrates—a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233, 259. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05744-0>
- Verdú, J. R., Lobo, J. M., Sánchez-Piñero, F., Gallego, B., Numa, C., Lumaret, J. P., et al. (2018). Ivermectin residues disrupt dung beetle diversity, soil properties and ecosystem functioning: An interdisciplinary field study. *Science of The Total Environment*, 618, 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.290>
- Wiens, J. J., & Zelinka, M. D. (2024). Climate change and biodiversity loss: Understanding interactions and feedbacks. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5, 245–261. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00591-6>

CAPÍTULO 1

TRENDS AND GAPS ON THE EFFECTS OF VETERINARY MEDICAL PRODUCTS ON DUNG BEETLES

Submetido para a revista *Neotropical Entomology*

INTRODUCTION

The increase in market demands for meat and dairy products has generated a management intensification of cattle herds and the expansion of grazing areas (Michalk et al., 2019; Filazzola et al., 2020; OECD/FAO, 2021). Pastures occupy more than a third of the earth's surface and support about 40% of global agricultural household products (Herrero et al., 2013). As a result of this expansion, there has also been an increase in the use of veterinary medical products (VMPs) worldwide (Tonelli et al., 2020; Broom, 2021; Thompson et al., 2023). Thus, land conversion for grazing exerts tremendous anthropogenic pressure on biological communities, yet the true impacts on biodiversity are still underestimated (Puniamoorthy et al., 2014; Wagner et al., 2021). In recent decades, entomologists have documented alarming declines in the occurrence, taxonomic richness, and geographic variety of insects worldwide (Cardoso et al., 2020; Samways et al., 2020) and pesticide use is among the primary causes contributing to these declines, affecting even those insects adapted to the grazing ecosystem (Manning et al., 2016; González-Gómez et al., 2023; Su et al., 2023; Puker et al., 2024).

Frequent anti-parasitic treatments negatively affect grassland biodiversity and ecosystem functioning (Buijs et al., 2022; Backmeyer et al., 2023). The macrocyclic lactones (MLs) – best known as avermectins – are products of the macrocyclic fermentation of *Streptomyces avermitilis* and are a potent and widespread class of VMPs used globally to treat a wide range of internal and external parasites in commercial herds, companion animals, and even humans (Ōmura, 2008). These substances act by preventing the transmission of electrical impulses in the muscles and nerves of invertebrates, making them an effective anti-parasitic and insecticide (Batiha et al., 2020), although it can affect all arthropod species, including nontarget organisms (Verdú et al., 2015; Villada-Bedoya et al., 2021; Bruinenberg et al., 2023). Most of the avermectins are not metabolized by animals, and about 90% is excreted in their feces and 2% in their urine (González Canga et al., 2009; Iglesias et al., 2011) – for example, mammals treated with ivermectin (one of the most widely used anti-parasitics) can excrete 62% to 98% of the inoculated drug (Floate et al., 2005). These VMPs' residues in mammalian feces cause adverse effects on coprophilous insects, especially on flies and beetles that use dung for feeding and reproduction (Strong 1992; Floate 2005). In areas where herds were treated with ivermectin, for example, the fecundity and survival of the dung beetle *Euoniticellus intermedius* were reduced by 30% and 50%, respectively (Martínez et al., 2017), while the decomposition time of dung was increased (Iglesias et al., 2011;

Ambrožová et al., 2021; González-Gómez et al., 2023; Su et al., 2023), rising the risk of disease proliferation and, consequently, decreasing herd productivity.

Dung beetles are one of the most important groups of insects inhabiting grazing ecosystems (Nichols et al., 2008). By handling and burying dung in pasture lands for feeding and reproducing (Davis et al., 1993; Holter, 2016), dung beetles significantly contribute to dung decomposition, in addition to controlling parasitic flies and acting to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions (Beynon et al., 2015; Piccini et al., 2017; Maldonado et al., 2019). During dung burying, dung beetles also participate in soil bioturbation processes, directly contributing to microbiota transport, secondary seed dispersal, plant growth, nutrient availability, and soil aeration (Johnson et al., 2016; Kenyon et al., 2016; Keller et al., 2022). However, despite the numerous benefits provided by dung beetles, there is no standardized research protocol to investigate the effects of VMPs on dung beetle species and assemblages. It is already known that ML residues present in dung can cause lethal and sub-lethal effects on dung beetles (Martínez et al., 2017). These effects range from changes in behavior and larval developmental time to decreased muscle strength, fertility, and survival in adults until the 28th day after ML administration in cattle (Wardhaugh et al., 1998; Kryger et al., 2005; Sands and Wall, 2018). Therefore, it is expected that the impacts on dung beetles resulting from the presence of VMPs will vary between species, depending on characteristics such as body size and functional group, which may reflect on the quality of pastures. For instance, while ivermectin caused an increase in the larval development time of *Euoniticellus intermedius* (Reiche, 1850) (Martínez et al., 2017), it was responsible for a decrease in the movement of adults of *Onthophagus similis* (Scriba, 1790) (Weaving et al., 2020), and reduced 67.3% of the diversity of coprophagous beetles in pastures between the years 2010 to 2020 in northern China (Su et al., 2023).

To fill this knowledge gap, this study proposes to aggregate and analyze existing experimental studies that investigated the effects of VMPs on dung beetles (Aphodiinae, Scarabaeinae, Geotrupidae). We evaluated the chronology of publications, the frequency of studies by continent, and the effects of VMPs on dung beetles in peer-reviewed experimental studies published until September 2023. In addition, we describe the main VMPs used and the effects observed in dung beetles, and suggest mitigation measures and other implications for the conservation of biodiversity and grassland ecosystems.

METHODS

Literature review

We systematically searched all peer-reviewed articles published until September 2023 on dung beetles and anti-parasitic. We reviewed articles aggregated on Web of Science (www.webofknowledge.com) and Scopus (www.scopus.com) that contained in their title, abstract, or keywords the terms: (“dung beetle*” OR scarab* OR “coprophagous beetle*”) AND (dihydroavermectin OR ivermectin OR milbemycin OR strumectomy OR antiparasit* OR anti-parasit* OR parasiticide OR heartland OR splice OR solandri OR “veterinary drug*” OR “veterinary endectocide” OR “veterinary medical product*” OR “macrocyclic lactone*”). Based on our inclusion criteria, we removed studies that did not indicate a test with dung beetles, the names of the species, and that did not mention a control treatment (Fig. 1).

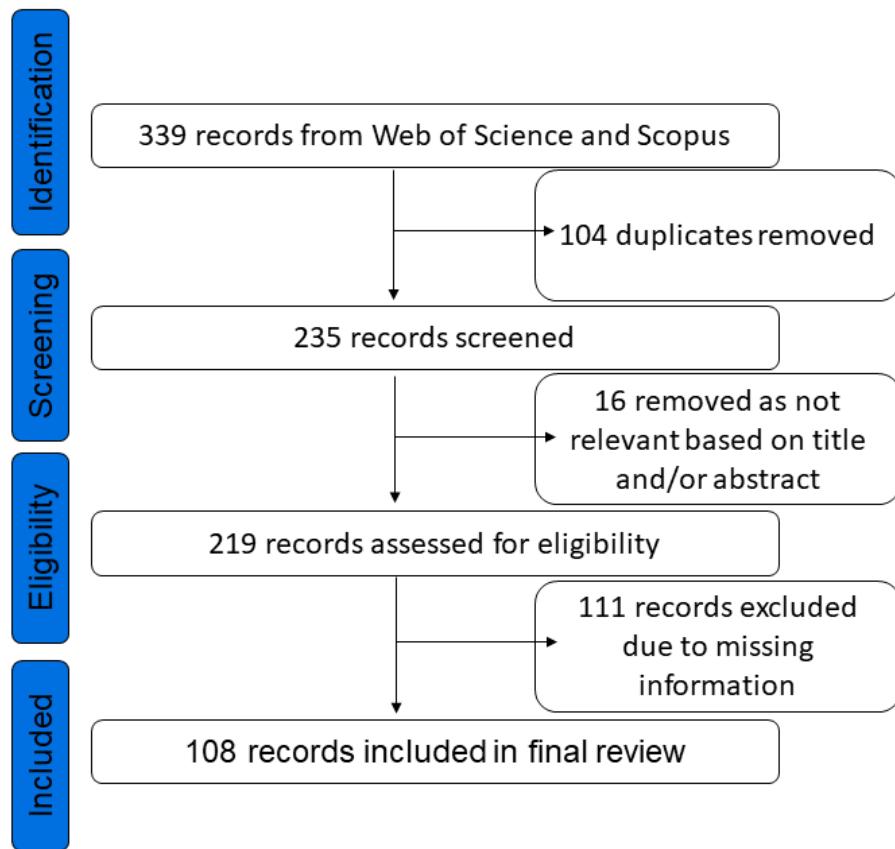


Figure 1. PRISMA flow diagram used in the screening process of studies that investigated the effects of veterinary medical products (VMPs) on dung beetles.

Data extraction

Our literature search resulted in a final sample of 108 eligible articles, which were reviewed in detail (including Appendices and Supplementary Materials, where applicable) (Supplementary material). For each study, we documented the following information: location of the study area, scientific name, veterinary drug, effect on dung beetle (feeding, locomotion, reproduction, larval development and change in sex ratio), and type of effect (negative, positive or null). Additionally, we conducted an exploratory analysis of the most frequently cited terms in the articles encompassed by this review, which culminated in the generation of a word cloud (Fig. 2). Furthermore, we compiled a comprehensive table outlining the predominant effects observed in dung beetles along with their corresponding pharmacological agents. Using the WordArttool (www.wordart.com), we imported the terms extracted from the literature, and the tool autonomously distributed the words based on their citation frequencies.

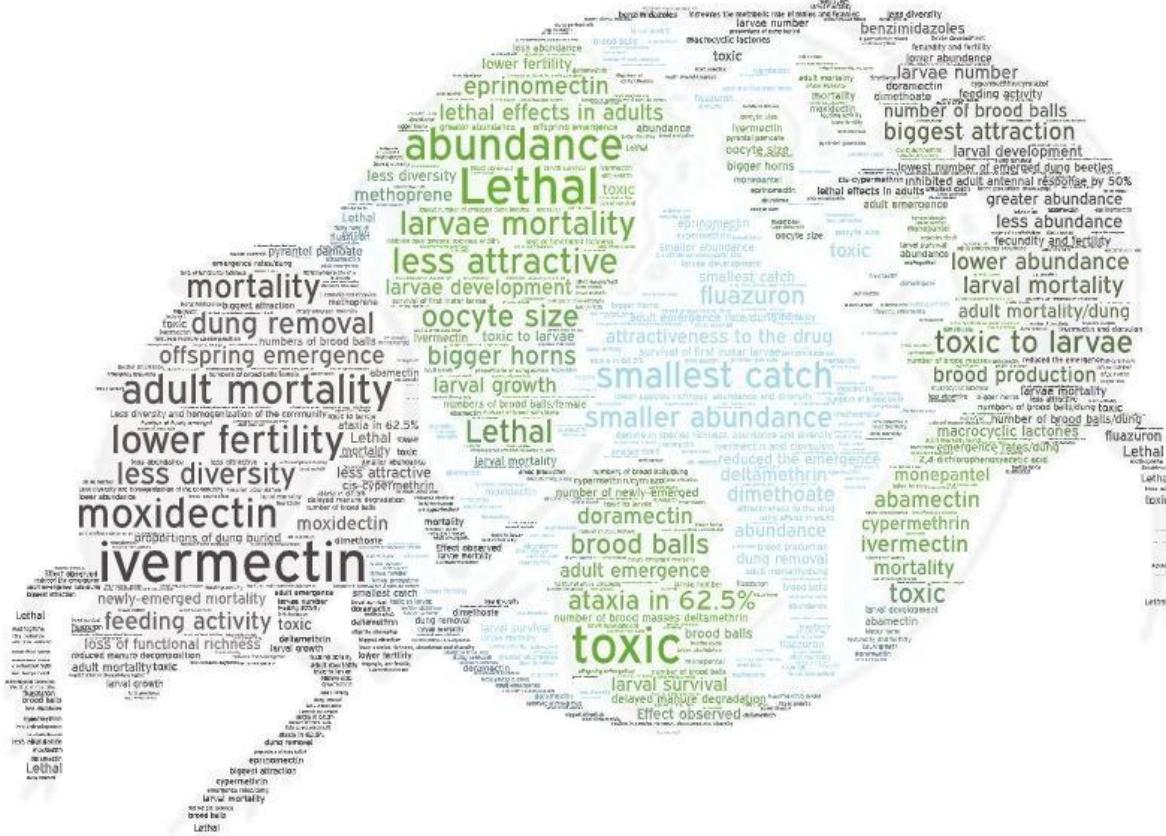


Figure 2. Relevant search word cloud considered studies that investigated the effects of veterinary medical products (VMPs) on dung beetles.

RESULTS AND DISCUSSION

Chronology of publications

The largest number of published studies ($n = 31$) was between 2016 and 2020, followed by 28 studies published between 1988 and 1999. Most recently, between 2021 and August 2023, 15 studies were published (Fig. 3). This recent increase in publications may reflect the growing demand for bovine products in the context of the current decline in insect populations, resulting in pressures for more ecological research for a better understanding of the VMPs' effects on nontarget organisms (Cardoso et al., 2020; Filazzola et al., 2020; Samways et al., 2020). In addition, the specific increase in the number of studies investigating the effects of VMPs on dung beetles may be associated with the optimization of economic gain in grazing systems and the acknowledgement of the economic valuation of the services provided by these insects in livestock systems (Yamada et al., 2007; Slade et al., 2016a; Lopez-Collado et al., 2017; Sands and Wall, 2017; Doube, 2018).

Beynon et al. (2015) estimated that the benefits provided by dung beetles in pastures in the United Kingdom can reach £ 367 million per year, the equivalent of US\$ 461.6 million (April 2024), the cessation of, largely unnecessary, treatment of adult cattle with anthelmintics could save the U.K. cattle industry an additional £ 6.2 million year $^{-1}$ [about US\$ 7.8 million (April 2024)] in addition to savings on the anthelmintics themselves. According to Losey and Vaughan (2006), the ecosystem services provided by dung beetles are estimated to be over US\$ 380 million per year in the United States. Thus, the development of research into the effects caused by VMPs on nontarget organisms is essential for the conservation and maintenance of insect populations in grazing systems, especially for insects that provide essential ecosystem services (Nichols et al., 2008; Brown et al., 2010; Doube, 2018; Perri et al., 2023).

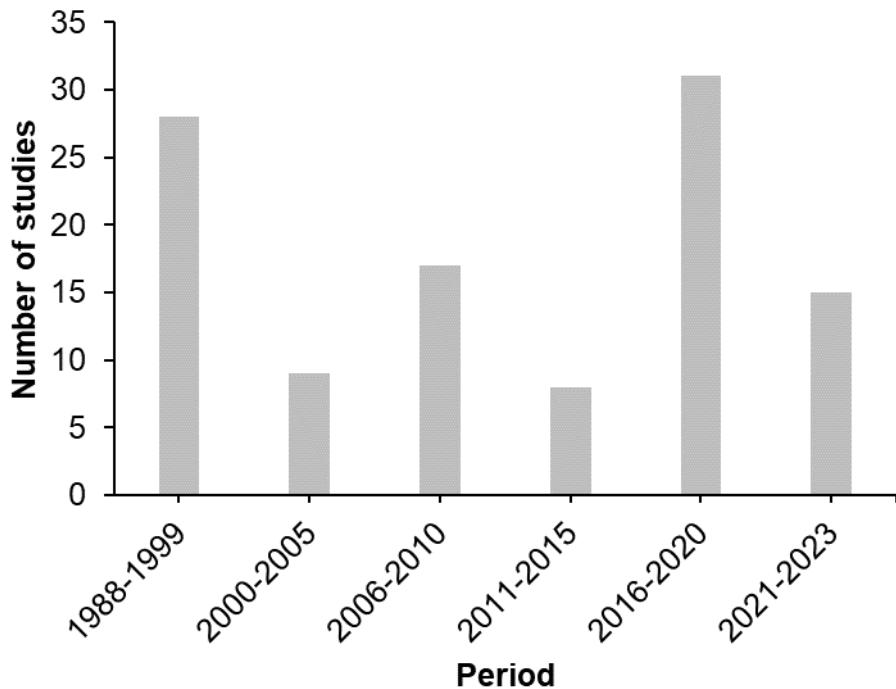


Figure 3. Year distribution of the studies that investigated the effects of veterinary medical products (VMPs) on dung beetles in the last three decades.

Geographical distribution of studies

Most of the studies were conducted on the European continent, accounting for 31% of the 108 studies, while South America had the lowest representation at 6%. North America, Asia, and Africa were represented in 28%, 9%, and 12% of the evaluated articles, respectively (Fig. 4). The distribution of studies does not correspond to the locations with the world's largest cattle herds and their associated products, as the largest cattle herds for meat and milk are concentrated on the two American continents (www.ourworldindata.org/meat-production). Additionally, the total number of dung beetle species recorded in the 108 eligible studies was 87, which corresponds to only 0.7% of the total number of dung beetle species described globally (approximately 11,644 species, including 6,903 Scarabaeinae, 3,612 Aphodiinae, and 1,129 Geotrupidae; www.catalogueoflife.org).

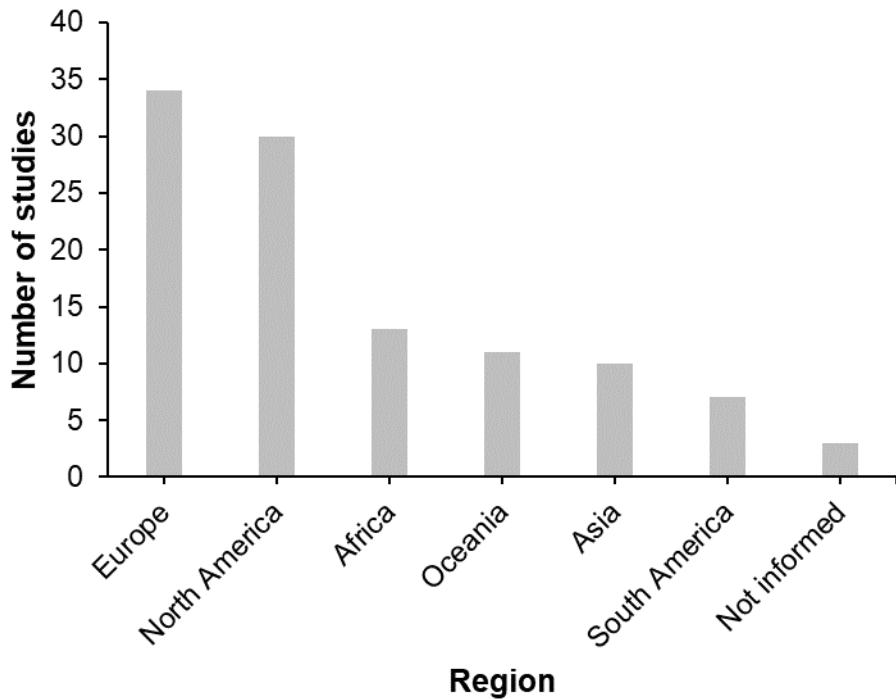


Figure 4. Distribution of studies that investigated the effects of veterinary medical products (VMPs) on dung beetles by continent (n = 108).

South America and Brazil distribution of studies

Only seven (6.5%) of the 108 studies were conducted in South America, none of which showed beneficial effects of veterinary medicinal products (VMPs) on dung beetles. In particular, South America has four times fewer studies than North America. The smaller number of studies demonstrates that the effects of VMPs on dung beetles in South America are incipient if we consider the cattle herds and grazing areas present there.

Brazil is the leading producer and the second-largest meat exporter, followed by the United States as the leading exporter of meat and dairy products (Broom, 2021). However, only three of the 108 studies on the effects of VMPs on dung beetles have been carried out in Brazil. According to the most recent data from MapBiomas (www.brasil.mapbiomas.org), Brazil has the largest pasture area in the world, allocating around 164.3 million hectares. This represents around 21% of the country's total area; however, our research found only three studies (up to September 2023) that investigated the effects of VMPs residues in these environments and in the ecosystems surrounding pastures. We emphasize the urgent need to investigate the effects of veterinary

medical products (VMPs) on nontarget organisms, whether they are used directly for prophylaxis and/or treatment of cattle or indirect contamination through pesticide feeding (Bruinenberg et al., 2023).

The limited number of studies examining the effects of veterinary medicinal products (VMPs) on dung beetles in Brazil is concerning, especially given the country's vast territorial expanse and environmental diversity. Livestock farming spans multiple biomes, each with distinct climatic conditions (Parente et al., 2019), supporting unique assemblages of dung beetles. According to the Taxonomic Catalog of the Fauna of Brazil (consulted in October 2024), Brazil is home to 787 species of Scarabaeinae, distributed across 69 genera, with 200 species being endemic. Tissiani et al. (2017) identified 76 dung beetle species in Brazilian pastures, distributed among 20 genera. However, Maldaner et al. (2024) called for a re-evaluation of this list, citing inconsistencies in the reported feeding habits and habitat preferences of some species, particularly in open environments. Their study documented 57 species of dung beetles in South American pastures that actively feed on bovine dung.

Despite this diversity, only three studies in Brazil have explored the effects of VMPs on dung beetle assemblages in pastures, with none addressing species-specific impacts. Future research should focus on filling this gap, particularly by investigating the primary genera found in Brazilian pastures. Considering the projected growth of livestock production (FAO, 2023) and the associated need to optimize sustainable practices, we also advocate for the standardization of methodologies to assess the effects of widely used VMPs on non-target organisms.

Despite the critical role of dung beetles in dung decomposition (Piccini et al., 2017), soil aeration and nutrition (Brown et al., 2010; Keller et al., 2022), pest control (e.g., horn fly) (Yamada et al., 2007) and in reducing GHG emissions (Nichols et al., 2008; Torabian et al., 2024), there remains a significant gap in understanding the effects of VMPs on dung beetle populations (Beynon et al., 2015; Slade et al., 2016a; Tonelli et al., 2020). We advocate for collaboration between scientists and the livestock industry to prioritize and support research initiatives aimed at safeguarding the essential role of dung beetles in ecosystem functioning. This partnership should be beneficial, and can optimize production by helping to improve pasture quality, resulting in by-products with higher nutritional quality. Already established initiatives, such as *The Dung Beetle Ecosystem Engineers Project* by MLA Meat & Livestock Australia and *Dung Beetle Innovations* in New Zealand, serve as successful models for such collaborations. Conservation efforts aimed

at dung beetles, and the valuable ecosystem services they provide, ensure the continued provision of functions essential for ecosystem health and directly benefit livestock production (Piccini et al., 2017; Fuzessy et al., 2021; Keller et al., 2022; Torabian et al., 2024).

Main dung beetle taxa recorded

The studies investigated the effects of the presence of VMPs on 39 genera of dung beetles. *Onthophagus* was the commonest genus, occurring in 23% of the studies, followed by *Aphodius* (22%), *Euoniticellus* (11%), and *Copris* (4%) (Fig 5). *Onthophagus* (Scarabaeinae) is a cosmopolitan paracoprid genus with more than 2000 species occurring in the Afrotropical and Nearctic regions, and a few dozen in Brazil; it possesses sexual dimorphism and has been used as model organisms for studies on sexual selection, biological radiation, origin of new characteristics, developmental plasticity, biocontrol, conservation and forensic biology (Nichols et al., 2008; Choi et al., 2010; Breeschoten et al., 2016). These important characteristics justify the large number of studies that focused on *Onthophagus*. The genus *Aphodius* (Aphodiinae) is one of the largest genera of coprophagous beetles and is found all over the world in a variety of habitats, including grasslands, forests, deserts and urban areas. Beetles of the genus *Euoniticellus* are paracoprids, usually digging tunnels below or near dung piles, and they are highly effective in decomposing manure (Tyndale-Biscoe, 1990; Nichols et al., 2008).

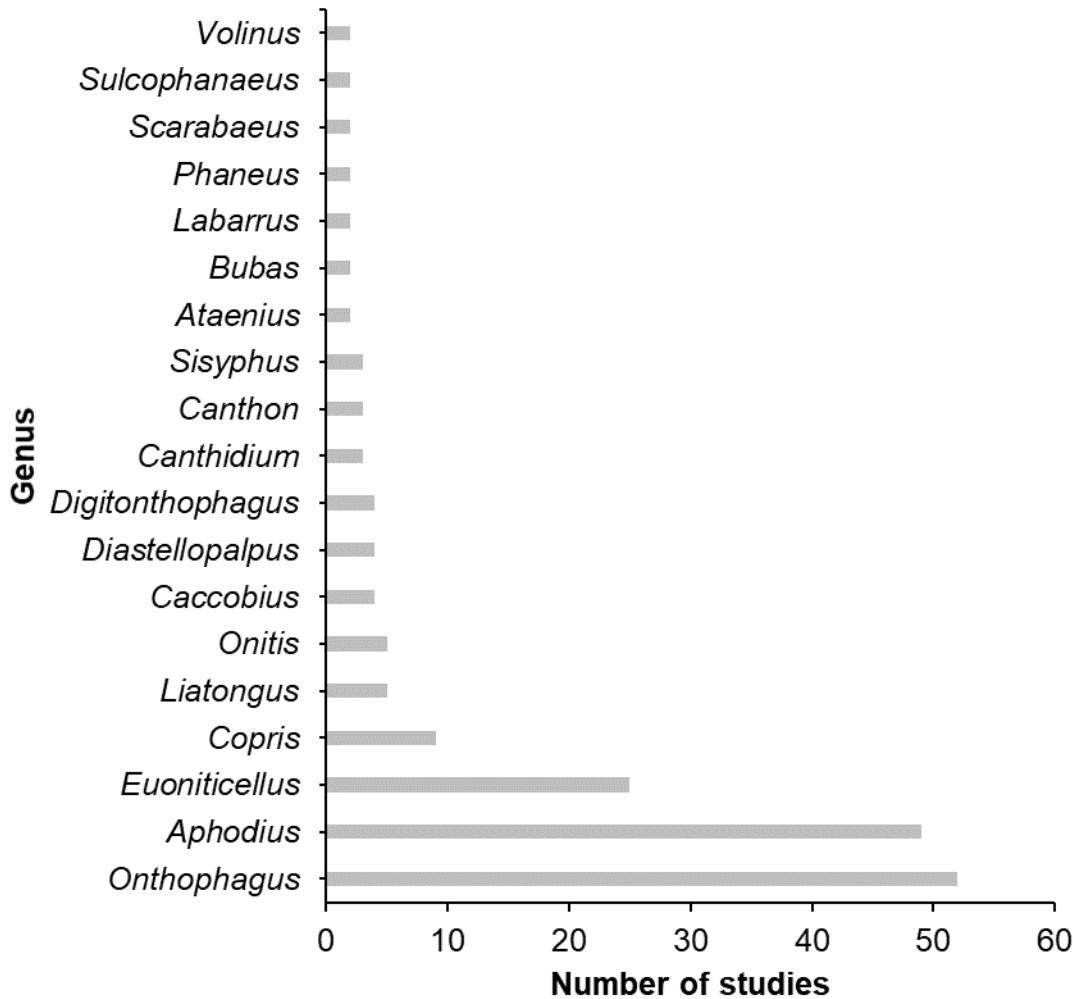


Figure 5. Number of studies on dung beetle genera for which the effects of veterinary medical products (VMPs) were investigated.

Main effects of VMPs on dung beetles

The majority of the studies reported negative effects (58%) of VMPs found in manure on dung beetles, while fewer studies reported positive effects (13%) or no effect (29%) (Fig. 6). The commonest VMPs were avermectins (i.e., ivermectin, doramectin, abamectin, eprinomectin and moxidectin), cis-cypermethrin + chlorpyrifos, methoprene, deltamethrin, albendazole and synthetic pyrethroids. The lethality and ataxia resulting from the presence of MLs, deltamethrin and cis-cypermethrin + chlorpyrifos were observed mainly in the reproductive phase of dung beetles, exerting a greater effect on newly emerged (immature) and on more advanced larval urges. The effects of the presence of avermectins in manure were analyzed in 78% of the studies. Wardhaugh

et al. (2001) and Martínez et al. (2017) observed that feces with high concentrations of ivermectin increase larval mortality, while Weaving et al. (2020) and Martínez et al. (2017) observed a decrease in the number of oocytes (reproductive structure) in females of *Onthophagus similis* (Scriba, 1790) and *Euoniticellus intermedius* (Reiche, 1850). Furthermore, the presence of ivermectin reduces the number of brood balls for the species *Digitonthophagus gazella* (Fabricius, 1787), *Copris acutidens* (Motschulsky, 1860), *Onthophagus bivertex* (Heyden, 1887), *Euoniticellus intermedius* (Reiche, 1850) and *Caccobius jessoensis* (Harold, 1867) (Krüger and Scholtz, 1997; Iwasa et al., 2007; Martínez et al., 2017; Ishikawa and Iwasa, 2019; Rodríguez-Vivas et al., 2020). Ivermectin increases the development time of *Euoniticellus intermedius* and *Onitis alexis* larvae (Krüger and Scholtz, 1997; Martínez et al., 2017) and reduces movement in adults of *Onthophagus similis* (Weaving et al., 2020).

Among these species, *Digitonthophagus gazella*, introduced in several countries, including Brazil, to address the accumulation of cattle manure and control horn fly (*Haematobia irritans*) populations, has been particularly affected. Despite its introduction to improve pasture ecosystem health, this species has suffered significant declines due to the indirect effects of prolonged ivermectin use. Correa et al. (2024) highlighted that over 25 years of ivermectin application in introduced pastures led to notable reductions in dung beetle diversity, emphasizing the unintended ecological consequences of VMPs on key functional groups within pasture ecosystems.

The presence of ivermectin attracted a greater number of *Nimbus contaminatus* (Herbst, 1783), *Caccobius schreberi* (Linnaeus, 1767), *Onthophagus joannae* (Linnaeus, 1767), *Liatongus militaris* (Castelnau, 1840) and *Euoniticelius intermedius*. In addition, an increase in the number of brood balls was observed for *Onthophagus lenzii* (Ishikawa and Iwasa, 2019), *Caccobius jessoensis* (Harold, 1867) (Iwasa et al., 2007) and *Liatongus minutus* (Motschulsky, 1860) (Iwasa et al., 2005). Additionally, the use of methoprene favored the increase of the pronotum width in *Onthophagus taurus* (Schreber, 1759) (Niño et al., 2009). Several hypotheses have been suggested about the effect of VMPs on the attractiveness of manure to dung beetles, but scientific tests for each VMP are lacking (Urrutia et al., 2024). One example is the hypothesis that a greater attraction of bovine dung treated with ivermectin could be due to the presence of indirect volatile compounds derived from the degradation of proteins contained in intestinal parasites killed by ivermectin after treatment and eliminated in the feces (Lumaret et al., 1993; Martínez et al., 2017).

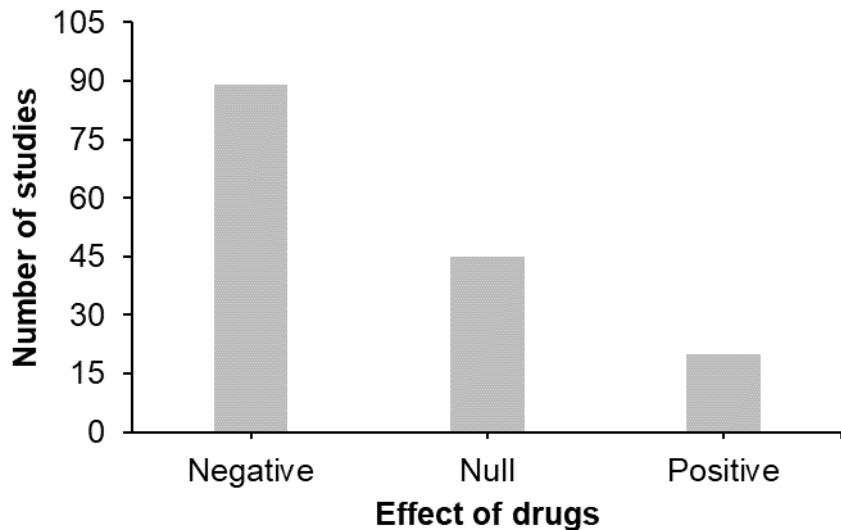


Figure 6. Number of studies that reported a negative, positive and null effect of veterinary medical products (VMPs) on dung beetles.

Most commonly used veterinary medical drug

Ivermectin is the most frequent drug evaluated in studies and the most popular (Fig. 7) as it acts on a wide range of internal and external parasites. Ivermectin is extensively used worldwide to treat both livestock and pets, contributing to an increase in the production of food and leather products (Crump and Omura, 2011). However, the presence of ivermectin residues in dung can cause ataxia in insects (Strong and Wall, 1994), such as observed in *Scarabaeus cicatricosus* dung beetles (Verdú et al., 2015). The effects of macrocyclic lactones can last well beyond their physical presence in the grazing system (Ambrožová et al., 2021; Villada-Bedoya et al., 2021; Bruinenberg et al., 2023; Su et al., 2023; González-Tokman et al., 2024); routine anti-parasitic treatment can negatively affect pasture biodiversity, affecting earthworms, flies, bees, birds and even plant germination and ecosystem functioning (Svendsen et al., 2003; Eichberg et al., 2016; Buijs et al., 2022; Backmeyer et al., 2023). Few studies have investigated the effects of other VMPs on dung beetles, but studies have reported contamination along the food chain (Eichberg et al., 2016; Peterson et al., 2020; Mahefarisoa et al., 2021; de Souza and Guimarães, 2022).

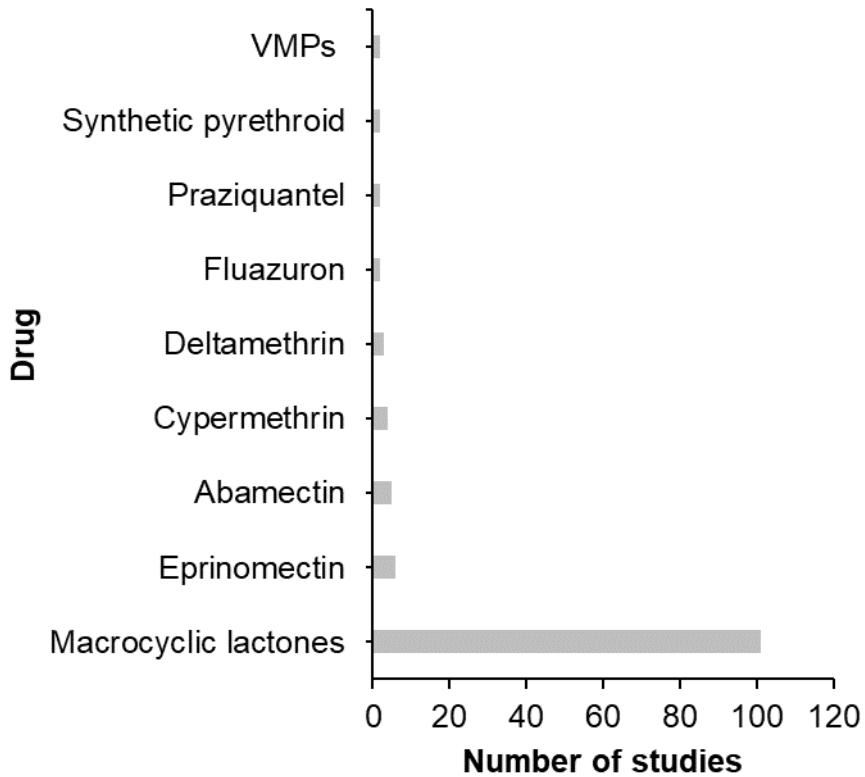


Figure 7. Veterinary medical products (VMPs) per number of studies that investigated their effects on dung beetles.

Final considerations and implications for further studies

The expansion of livestock herds needs to be accompanied by a proportionate increase in the number of studies aiming to mitigate the damage caused by VMPs on biodiversity (Puker et al., 2024), with particular attention to coprophagous organisms. These organisms provide matchless ecosystem services, including enhancing livestock productivity (Brown et al., 2010; Forgie et al., 2018; Lipton et al., 2023). The influence of grazing management on dung beetle communities remains yet poorly understood and warrants further investigation. Our results indicate that studies on the effects of veterinary medical products (VMPs) on dung beetles are incipient in South America, especially in Brazil, the leading meat producer and the second-largest exporter. The unmonitored use of VMPs can lead to indirect impacts from grazing, which may affect various trophic levels (Peterson et al., 2020; Mahefarisoa et al., 2021; Buijs et al., 2022). The pace of anthropogenic change exceeds our capacity to document its impacts, which can lead to increasingly unpredictable outcomes (Yang et al., 2017; Bruinenberg et al., 2023; González-

Tokman et al., 2024). Therefore, the application of VMPs should ideally be limited to animals with parasites, adhering to specified rules and dosages to minimize the ecological impact of these substances on nontarget organisms.

We also suggest that the application of VMPs be carried out when there are no other options for use, such as the use of phytochemical compounds with anthelmintics (Romero-Benavides et al., 2017; Verdú et al., 2023). Whenever possible, investments are needed to improve diagnostic methods that are more economical and practical for detecting and treating diseases in farm animals. Then, the use of MVs can be more effectively targeted towards parasitized animals and as prophylaxis. Alternatively, the use of alternative phytochemical compounds that are not toxic to nontarget organisms in the management of pastoral systems should be encouraged (Verdú et al., 2023). Furthermore, treated animals could be separated from the others, and after the application of VMPs, the effects on nontarget organisms should be monitored and recorded. In addition, we suggest a standardized protocol for monitoring the effects of VMPs on nontarget organisms, covering both the coprophagous fauna responsible for processing waste in pasture areas and the soil fauna (Svendsen et al., 2003). Finally, alternatives must be meticulously evaluated to ensure that the benefits of any anti-parasitic treatment outweigh the drawbacks, particularly in regions where maintaining biodiversity is a challenge and in organic farming systems. If these precautions are taken, the excretion of toxic residues by VMPs can be avoided, ensuring the maintenance of dung beetle communities and warranting the essential services they offer without compromising productivity.

REFERENCES

- Ambrožová, L., Sládeček, F. X. J., Zítek, T., Perlík, M., Kozel, P., Jirků, M., et al. (2021). Lasting decrease in functionality and richness: Effects of ivermectin use on dung beetle communities. *Agric Ecosyst Environ* 321, 107634. doi: 10.1016/j.agee.2021.107634
- Backmeyer, S. J., Goater, C., Challis, J. K., and Floate, K. D. (2023). Season-Long Simplification of Insect Communities in Dung from Cattle Treated With an Extended-Release Formulation of the Parasiticide Eprinomectin. *Environ Toxicol Chem* 42, 684–697. doi: 10.1002/etc.5558
- Batiha, G. E.-S., Alqahtani, A., Ilesanmi, O. B., Saati, A. A., El-Mleeh, A., Hetta, H. F., et al. (2020). Avermectin Derivatives, Pharmacokinetics, Therapeutic and Toxic Dosages,

- Mechanism of Action, and Their Biological Effects. *Pharmaceuticals* 13, 196. doi: 10.3390/ph13080196
- Beynon, S. A., Wainwright, W. A., and Christie, M. (2015). The application of an ecosystem services framework to estimate the economic value of dung beetles to the U.K. cattle industry. *Ecol Entomol* 40, 124–135. doi: 10.1111/een.12240
- Breeschoten, T., Doorenweerd, C., Tarasov, S., and Vogler, A. P. (2016). Phylogenetics and biogeography of the dung beetle genus *Onthophagus* inferred from mitochondrial genomes. *Mol Phylogenet Evol* 105, 86–95. doi: 10.1016/j.ympev.2016.08.016
- Broom, D. M. (2021). A method for assessing sustainability, with beef production as an example. *Biological Reviews* 96, 1836–1853. doi: 10.1111/brv.12726
- Brown, J., Scholtz, C. H., Janeau, J.-L., Grellier, S., and Podwojewski, P. (2010). Dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) can improve soil hydrological properties. *Applied Soil Ecology* 46, 9–16. doi: 10.1016/j.apsoil.2010.05.010
- Bruinenberg, M., van Agtmaal, M., Hoekstra, N., and van Eekeren, N. (2023). Residues of pesticides in dairy cow rations and fly treatments reduce the number of Coleoptera in dung. *Agric Ecosyst Environ* 344, 108307. doi: 10.1016/j.agee.2022.108307
- Buijs, J., Ragas, A., and Mantingh, M. (2022). Presence of pesticides and biocides at Dutch cattle farms participating in bird protection programs and potential impacts on entomofauna. *Science of The Total Environment* 838, 156378. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156378
- Cardoso, P., Barton, P. S., Birkhofer, K., Chichorro, F., Deacon, C., Fartmann, T., et al. (2020). Scientists' warning to humanity on insect extinctions. *Biol Conserv* 242, 108426. doi: 10.1016/j.biocon.2020.108426
- Correa, C. M. A., Salomão, R. P., Abot, A. R., Puker, A., & Vaz-De-Mello, F. Z. (2024). Evidence of drastic loss of dung beetle diversity after 25 years in an introduced Brazilian pasture. *Austral Ecology*, 49(4), e13515. <https://doi.org/10.1111/aec.13515>
- Choi, J.-H., Kijimoto, T., Snell-Rood, E., Tae, H., Yang, Y., Moczek, A. P., et al. (2010). Gene discovery in the horned beetle *Onthophagus taurus*. *BMC Genomics* 11, 703. doi: 10.1186/1471-2164-11-703
- Crump, A., and Omura, S. (2011). Ivermectin, “Wonder drug” from Japan: the human use perspective. *Proceedings of the Japan Academy, Series B* 87, 13–28. doi: 10.2183/pjab.87.13

- Davis, A. J., Hanski, I., and Cambefort, Y. (1993). Dung Beetle Ecology. *J Anim Ecol* 62, 396. doi: 10.2307/5374
- de Souza, R. B., and Guimarães, J. R. (2022). Effects of Avermectins on the Environment Based on Its Toxicity to Plants and Soil Invertebrates—a Review. *Water Air Soil Pollut* 233, 259. doi: 10.1007/s11270-022-05744-0
- Doube, B. M. (2018). Ecosystem services provided by dung beetles in Australia. *Basic Appl Ecol* 26, 35–49. doi: 10.1016/j.baae.2017.09.008
- Eichberg, C., Wohde, M., Müller, K., Rausch, A., Scherrmann, C., Scheuren, T., et al. (2016). The Anthelmintic Ingredient Moxidectin Negatively Affects Seed Germination of Three Temperate Grassland Species. *PLoS One* 11, e0166366. doi: 10.1371/journal.pone.0166366
- FAO (2023). *The impact of disasters on agriculture and food security 2023*. doi: 10.4060/cc7900en
- Filazzola, A., Brown, C., Dettlaff, M. A., Batbaatar, A., Grenke, J., Bao, T., et al. (2020). The effects of livestock grazing on biodiversity are multi-trophic: a meta-analysis. *Ecol Lett* 23, 1298–1309. doi: 10.1111/ele.13527
- Floate, K. D., Wardhaugh, K. G., Boxall, A. B. A., and Sherratt, T. N. (2005). FECAL RESIDUES OF VETERINARY PARASITICIDES: Nontarget Effects in the Pasture Environment. *Annu Rev Entomol* 50, 153–179. doi: 10.1146/annurev.ento.50.071803.130341
- Forgie, S. A., Paynter, Q., Zhao, Z., Flowers, C., and Fowler, S. V. (2018). Newly released non-native dung beetle species provide enhanced ecosystem services in New Zealand pastures. *Ecol Entomol* 43, 431–439. doi: 10.1111/een.12513
- Fuzessy, L. F., Benítez-López, A., Slade, E. M., Bufalo, F. S., Magro-de-Souza, G. C., Pereira, L. A., et al. (2021). Identifying the anthropogenic drivers of declines in tropical dung beetle communities and functions. *Biol Conserv* 256, 109063. doi: 10.1016/j.biocon.2021.109063
- González Canga, A., Sahagún Prieto, A. M., José Diez Liébana, M., Martínez, N. F., Vega, M. S., and Vieitez, J. J. G. (2009). The pharmacokinetics and metabolism of ivermectin in domestic animal species. *The Veterinary Journal* 179, 25–37. doi: 10.1016/j.tvjl.2007.07.011
- González-Gómez, L., González-Tokman, D., García, J. H., Lira-Noriega, A., and Escobar, F. (2023). Influence of landscape and livestock management on dung beetle diversity in

- tropical cattle pastures. *Biodivers Conserv* 32, 1687–1707. doi: 10.1007/s10531-023-02571-5
- González-Tokman, D., Arellano-Torres, A., Baena-Díaz, F., Bustos-Segura, C., and M., I. M. (2024). Ivermectin resistance in dung beetles exposed for multiple generations. *bioRxiv*, 2023.05.08.539900. doi: 10.1101/2023.05.08.539900
- Herrero, M., Havlík, P., Valin, H., Notenbaert, A., Rufino, M. C., Thornton, P. K., et al. (2013). Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 20888–20893. doi: 10.1073/pnas.1308149110
- Holter, P. (2016). Herbivore dung as food for dung beetles: elementary coprology for entomologists. *Ecol Entomol* 41, 367–377. doi: 10.1111/een.12316
- Iglesias, L. E., Fusé, L. A., Lifschitz, A. L., Rodríguez, E. M., Sagüés, M. F., and Saumell, C. A. (2011). Environmental monitoring of ivermectin excreted in spring climatic conditions by treated cattle on dung fauna and degradation of faeces on pasture. *Parasitol Res* 108, 1185–1191. doi: 10.1007/s00436-010-2161-y
- Ishikawa, I., and Iwasa, M. (2019). Effects of eprinomectin on the survival, reproduction and feeding activity of the dung beetles, *Onthophagus lenzii* Harold, and rare species, *Copris ochus* Motschulsky (Coleoptera: Scarabaeidae). *Bull Entomol Res* 109, 191–198. doi: 10.1017/S0007485318000317
- Iwasa, M., Maruo, T., Ueda, M., and Yamashita, N. (2007). Adverse effects of ivermectin on the dung beetles, *Caccobius jessoensis* Harold, and rare species, *Copris ochus* Motschulsky and *Copris acutidens* Motschulsky (Coleoptera: Scarabaeidae), in Japan. *Bull Entomol Res* 97, 619–625. doi: 10.1017/S0007485307005329
- Iwasa, M., Nakamura, T., Fukaki, K., and Yamashita, N. (2005). Nontarget Effects of Ivermectin on Coprophagous Insects in Japan. *Environ Entomol* 34, 1485–1492. doi: 10.1603/0046-225X-34.6.1485
- Johnson, S. N., Lopaticki, G., Barnett, K., Facey, S. L., Powell, J. R., and Hartley, S. E. (2016). An insect ecosystem engineer alleviates drought stress in plants without increasing plant susceptibility to an above-ground herbivore. *Funct Ecol* 30, 894–902. doi: 10.1111/1365-2435.12582

- Keller, N., van Meerveld, I., Ghazoul, J., Chiew, L. Y., Philipson, C. D., Godoong, E., et al. (2022). Dung beetles as hydrological engineers: effects of tunnelling on soil infiltration. *Ecol Entomol* 47, 84–94. doi: 10.1111/een.13094
- Kenyon, T. M., Mayfield, M. M., Monteith, G. B., and Menéndez, R. (2016). The effects of land use change on native dung beetle diversity and function in Australia's Wet Tropics. *Austral Ecol* 41, 797–808. doi: 10.1111/aec.12366
- Krüger, K., and Scholtz, C. H. (1997). Lethal and sublethal effects of ivermectin on the dung-breeding beetles *Euoniticellus intermedius* (Reiche) and *Onitis alexis* Klug (Coleoptera, Scarabaeidae). *Agric Ecosyst Environ* 61, 123–131. doi: 10.1016/S0167-8809(96)01108-5
- Kryger, U., Deschodt, C., and Scholtz, C. H. (2005). Effects of fluazuron and ivermectin treatment of cattle on the structure of dung beetle communities. *Agric Ecosyst Environ* 105, 649–656. doi: 10.1016/j.agee.2004.08.003
- Lipton, S., Meyer, R. S., Richardson, G., and Philpott, S. M. (2023). *Onthophagus taurus* Increases Soil Microbes Associated with Nutrient Cycling in California Pastureland Soils. *Rangel Ecol Manag* 91, 24–29. doi: 10.1016/j.rama.2023.07.007
- Lopez-Collado, J., Cruz-Rosales, M., Vilaboa-Arroniz, J., Martínez-Morales, I., and Gonzalez-Hernandez, H. (2017). Contribution of dung beetles to cattle productivity in the tropics: A stochastic-dynamic modeling approach. *Agric Syst* 155, 78–87. doi: 10.1016/j.agrsy.2017.05.001
- Losey, J. E., and Vaughan, M. (2006). The Economic Value of Ecological Services Provided by Insects. *Bioscience* 56, 311–323. doi: 10.1641/0006-3568(2006)56[311:TEVOES]2.0.CO;2
- Lumaret, J. P., Galante, E., Lumbresas, C., Mena, J., Bertrand, M., Bernal, J. L., et al. (1993). Field Effects of Ivermectin Residues on Dung Beetles. *J Appl Ecol* 30, 428. doi: 10.2307/2404183
- Mahefarioa, K. L., Simon Delso, N., Zaninotto, V., Colin, M. E., and Bonmatin, J. M. (2021). The threat of veterinary medicinal products and biocides on pollinators: A One Health perspective. *One Health* 12, 100237. doi: 10.1016/j.onehlt.2021.100237
- Maldaner, M. E., Costa-Silva, V. D., & Vaz-de-Mello, F. Z. (2024). Dung beetles in South American pasturelands. *Biota Neotropica*, 24(1), e20231567. doi:10.1590/1676-0611-BN-2023-1567

- Maldonado, M. B., Aranibar, J. N., Serrano, A. M., Chacoff, N. P., and Vázquez, D. P. (2019). Dung beetles and nutrient cycling in a dryland environment. *Catena (Amst)* 179, 66–73. doi: 10.1016/j.catena.2019.03.035
- Manning, P., Slade, E. M., Beynon, S. A., and Lewis, O. T. (2016). Functionally rich dung beetle assemblages are required to provide multiple ecosystem services. *Agric Ecosyst Environ* 218, 87–94. doi: 10.1016/j.agee.2015.11.007
- Martínez, I. M., Lumaret, J.-P., Ortiz Zayas, R., and Kadiri, N. (2017). The effects of sublethal and lethal doses of ivermectin on the reproductive physiology and larval development of the dung beetle *Euoniticellus intermedius* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Can Entomol* 149, 461–472. doi: 10.4039/tce.2017.11
- Michalk, D. L., Kemp, D. R., Badgery, W. B., Wu, J., Zhang, Y., and Thomassin, P. J. (2019). Sustainability and future food security—A global perspective for livestock production. *Land Degrad Dev* 30, 561–573. doi: 10.1002/ldr.3217
- Nichols, E., Spector, S., Louzada, J., Larsen, T., Amezquita, S., and Favila, M. E. (2008). Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. *Biol Conserv* 141, 1461–1474. doi: 10.1016/j.biocon.2008.04.011
- Niño, E. L., Sorenson, C. E., Washburn, S. P., and Watson, D. W. (2009). Effects of the Insect Growth Regulator, Methoprene, on *Onthophagus taurus* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Environ Entomol* 38, 493–498. doi: 10.1603/022.038.0224
- OECD/FAO (2021). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030*. OECD. doi: 10.1787/19428846-en
- Ōmura, S. (2008). Ivermectin: 25 years and still going strong. *Int J Antimicrob Agents* 31, 91–98. doi: 10.1016/j.ijantimicag.2007.08.023
- Parente, L., Mesquita, V., Miziara, F., Baumann, L., and Ferreira, L. (2019). Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. *Remote Sens Environ* 232, 111301. doi: 10.1016/j.rse.2019.111301
- Perri, D. V., Bruzzone, O., and Easdale, M. H. (2023). Ecological relationships between coprophagous insects and livestock production: a review. *Bull Entomol Res* 113, 735–747. doi: 10.1017/S0007485323000494

- Peterson, E. M., Green, F. B., and Smith, P. N. (2020). Pesticides Used on Beef Cattle Feed Yards Are Aerially Transported into the Environment Via Particulate Matter. *Environ Sci Technol* 54, 13008–13015. doi: 10.1021/acs.est.0c03603
- Piccini, I., Arnieri, F., Caprio, E., Nervo, B., Pelissetti, S., Palestini, C., et al. (2017). Greenhouse gas emissions from dung pats vary with dung beetle species and with assemblage composition. *PLoS One* 12, e0178077. doi: 10.1371/journal.pone.0178077
- Puker, A., de Oliveira, M. J. G., da Silva, G. C., de Albuquerque Correa, C. M., Salomão, R. P., Oliveira, M. A., et al. (2024). Structure of dung beetle assemblages (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae) in native forest and exotic pastures in the Southwest of the Brazilian Amazon. *Biologia (Bratisl)* 79, 879–891. doi: 10.1007/s11756-023-01591-4
- Puniamoorthy, N., Schäfer, M. A., Römbke, J., Meier, R., and Blanckenhorn, W. U. (2014). Ivermectin sensitivity is an ancient trait affecting all ecdysozoa but shows phylogenetic clustering among sepsid flies. *Evol Appl* 7, 548–554. doi: 10.1111/eva.12152
- Rodríguez-Vivas, R. I., Basto-Estrella, G. S., Reyes-Novelo, E., Arceo-Moran, A. A., Arcila-Fuentes, W. R., Ojeda-Chi, M. M., et al. (2020). Evaluation of the attraction, lethal and sublethal effects of the faeces of ivermectin-treated cattle on the dung beetle *Digitonophagusperezii* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Aust Entomol* 59, 368–374. doi: 10.1111/aen.12450
- Romero-Benavides, J. C., Ruano, A. L., Silva-Rivas, R., Castillo-Veintimilla, P., Vivanco-Jaramillo, S., and Bailon-Moscoso, N. (2017). Medicinal plants used as anthelmintics: Ethnomedical, pharmacological, and phytochemical studies. *Eur J Med Chem* 129, 209–217. doi: 10.1016/j.ejmech.2017.02.005
- Samways, M. J., Barton, P. S., Birkhofer, K., Chichorro, F., Deacon, C., Fartmann, T., et al. (2020). Solutions for humanity on how to conserve insects. *Biol Conserv* 242, 108427. doi: 10.1016/j.biocon.2020.108427
- Sands, B., and Wall, R. (2017). Dung beetles reduce livestock gastrointestinal parasite availability on pasture. *Journal of Applied Ecology* 54, 1180–1189. doi: 10.1111/1365-2664.12821
- Sands, B., and Wall, R. (2018). Sustained parasiticide use in cattle farming affects dung beetle functional assemblages. *Agric Ecosyst Environ* 265, 226–235. doi: 10.1016/j.agee.2018.06.012

- Slade, E. M., Riutta, T., Roslin, T., and Tuomisto, H. L. (2016). The role of dung beetles in reducing greenhouse gas emissions from cattle farming. *Sci Rep* 6, 18140. doi: 10.1038/srep18140
- Stanbrook-Buyer, R., Bhat, M., & King, J. R. (2024). Economic value of dung removal by dung beetles in US sub-tropical pastures. *Basic and Applied Ecology*, 79, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2024.07.001>
- Strong, L., and Wall, R. (1994). Effects of ivermectin and moxidectin on the insects of cattle dung. *Bull Entomol Res* 84, 403–409. doi: 10.1017/S0007485300032533
- Su, H., Xu, H., Su, B., Liu, W., Cao, Y., and Li, Y. (2023). Macroyclic lactone residues in cattle dung result in a sharp decline in the population of dung beetles in the rangelands of northern China. *Agric Ecosyst Environ* 356, 108621. doi: 10.1016/j.agee.2023.108621
- Svendsen, T. S., Grønvold, J., Holter, P., and Sommer, C. (2003). Field effects of ivermectin and fenbendazole on earthworm populations and the disappearance of dung pats from bolus-treated cattle. *Applied Soil Ecology* 24, 207–218. doi: 10.1016/S0929-1393(03)00096-9
- Thompson, L., Rowntree, J., Windisch, W., Waters, S. M., Shalloo, L., and Manzano, P. (2023). Ecosystem management using livestock: embracing diversity and respecting ecological principles. *Animal Frontiers* 13, 28–34. doi: 10.1093/af/vfac094
- Tissiani, A. S. de O., Vaz-de-Mello, F. Z., and Campelo-Júnior, J. H. (2017). Dung beetles of Brazilian pastures and key to genera identification (Coleoptera: Scarabaeidae). *Pesqui Agropecu Bras* 52, 401–418. doi: 10.1590/s0100-204x2017000600004
- Tonelli, M., Verdú, J. R., Morelli, F., and Zunino, M. (2020). Dung beetles: functional identity, not functional diversity, accounts for ecological process disruption caused by the use of veterinary medical products. *J Insect Conserv* 24, 643–654. doi: 10.1007/s10841-020-00240-4
- Torabian, S., Leffler, A. J., and Perkins, L. (2024). Importance of restoration of dung beetles in the maintenance of ecosystem services. *Ecological Solutions and Evidence* 5. doi: 10.1002/2688-8319.12297
- Tyndale-Biscoe, M. (1990). *Common Dung Beetles in Pastures of South-eastern Australia*. CSIRO Publishing. doi: 10.1071/9780643100824

- Urrutia, M. A., Cortez, V., Rosa-García, R., García-Prieto, U., and Verdú, J. R. (2024). Analysing the effect of ivermectin on the volatile organic compounds of dung and its possible influence on attraction to dung beetles. *Ecol Entomol* 49, 386–396. doi: 10.1111/een.13314
- Verdú, J. R., Cortez, V., Ortiz, A. J., González-Rodríguez, E., Martínez-Pinna, J., Lumaret, J.-P., et al. (2015). Low doses of ivermectin cause sensory and locomotor disorders in dung beetles. *Sci Rep* 5, 13912. doi: 10.1038/srep13912
- Verdú, J. R., Cortez, V., Rosa-García, R., Ortiz, A. J., García-Prieto, U., Lumaret, J.-P., et al. (2023). Nontoxic effects of thymol, carvacrol, cinnamaldehyde, and garlic oil on dung beetles: A potential alternative to ecotoxic anthelmintics. *PLoS One* 18, e0295753. doi: 10.1371/journal.pone.0295753
- Villada-Bedoya, S., Chávez-Ríos, J. R., Montoya, B., Castelán, F., Córdoba-Aguilar, A., Escobar, F., et al. (2021). Heat shock proteins and antioxidants as mechanisms of response to ivermectin in the dung beetle *Euoniticellus intermedius*. *Chemosphere* 269, 128707. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128707
- Wagner, D. L., Grames, E. M., Forister, M. L., Berenbaum, M. R., and Stopak, D. (2021). Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118. doi: 10.1073/pnas.2023989118
- Wardhaugh, K. G., Holter, P., and Longstaff, B. (2001). The development and survival of three species of coprophagous insect after feeding on the faeces of sheep treated with controlled-release formulations of ivermectin or albendazole. *Aust Vet J* 79, 125–132. doi: 10.1111/j.1751-0813.2001.tb10721.x
- Wardhaugh, K. G., Longstaff, B. C., and Lacey, M. J. (1998). Effects of residues of deltamethrin in cattle faeces on the development and survival of three species of dungbreeding insect. *Aust Vet J* 76, 273–280. doi: 10.1111/j.1751-0813.1998.tb10159.x
- Weaving, H., Sands, B., and Wall, R. (2020). Reproductive sublethal effects of macrocyclic lactones and synthetic pyrethroids on the dung beetle *Onthophagus similis*. *Bull Entomol Res* 110, 195–200. doi: 10.1017/S0007485319000567
- Yamada, D., Imura, O., Shi, K., and Shibuya, T. (2007). Effect of tunneler dung beetles on cattle dung decomposition, soil nutrients and herbage growth. *Grassl Sci* 53, 121–129. doi: 10.1111/j.1744-697X.2007.00082.x

Yang, Y., Ok, Y. S., Kim, K.-H., Kwon, E. E., and Tsang, Y. F. (2017). Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. *Science of The Total Environment* 596–597, 303–320. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.102

CAPÍTULO 2

**ESTRUTURA E DIVERSIDADE DE BESOUROS ROLA-BOSTAS EM PAISAGENS DA
MATA ATLÂNTICA: INFLUÊNCIA DA COBERTURA FLORESTAL E DO IMPACTO
ANTRÓPICO**

INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é um dos mais diversos e ameaçados hotspots de biodiversidade do mundo (Myers et al., 2000; Vancine et al., 2024), sendo classificada como área prioritária para a conservação (Myers et al., 2000; Rezende et al., 2018). Esse bioma desempenha um papel essencial na manutenção de diversos serviços ecossistêmicos insubstituíveis, fundamentais tanto para o bem-estar humano quanto para o desenvolvimento econômico. Entre esses serviços, destacam-se a provisão de água para mais de 125 milhões de brasileiros e a oferta de recursos alimentares para as populações locais (Joly et al., 2014; Schroth et al., 2016; Rezende et al., 2018).

No entanto, o desmatamento da Mata Atlântica teve início ainda durante a colonização portuguesa, em 1500, e permanece como um dos principais desafios para sua conservação (Ribeiro et al., 2009; Marques e Grelle, 2021). Atualmente, estima-se que restam apenas 36% da cobertura vegetal original do bioma (Vancine et al., 2024). A porção localizada no sul da Bahia é particularmente importante devido à sua alta taxa de endemismo (Silva e Vaz-de-Mello, 2020; Dalapicolla et al., 2021; de Souza et al., 2021; Teles et al., 2022) e à forte pressão antrópica, incluindo desmatamento, pecuária, corte seletivo de madeiras nobres e caça ilegal (Flesher e Laufer, 2013; Cassano et al., 2014; Magioli et al., 2021b).

Compreender as alterações na composição das espécies entre ambientes naturais e áreas sob influência humana é essencial para a ciência da conservação (Gardner et al., 2009; Chowdhury et al., 2023). Essa compreensão permite o desenvolvimento e a implementação de estratégias eficazes de conservação e gestão da biodiversidade, viabilizando a identificação das áreas mais vulneráveis ao impacto humano, das espécies em maior risco e dos fatores responsáveis pela perda da biodiversidade (Strassburg et al., 2020; Wagner et al., 2021; Outhwaite et al., 2022). Nesse contexto, os invertebrados desempenham um papel fundamental nos ecossistemas, mas ainda são subestimados e pouco estudados (Scudder, 2017; Samways et al., 2020). Essa lacuna no conhecimento é preocupante, especialmente diante da extinção em andamento de diversas espécies de invertebrados a chamada "extinção silenciosa" (Eisenhauer et al., 2019; Harvey et al., 2023). Estudos demonstram que a redução da cobertura florestal afeta negativamente a diversidade de insetos e de outros grupos ecológicos (Rocha-Santos et al., 2016; Nunes et al., 2018; Faria et al., 2023; Bogoni et al., 2024).

A perda de habitat resultante da fragmentação, do desmatamento e de outras atividades humanas tem causado coextinções entre espécies interconectadas (Dirzo et al., 2014; Bogoni et al.,

2019; Turvey e Crees, 2019). No entanto, as interações ecológicas envolvidas nesses processos ainda são pouco compreendidas (Malhi et al., 2014; Régnier et al., 2015). Entre os grupos mais impactados por essas mudanças estão os besouros escarabeíneos (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae), conhecidos popularmente como besouros "rola-bostas" devido ao seu hábito peculiar de se alimentar de detritos orgânicos, especialmente esterco de mamíferos (Davis et al., 1993; Holter, 2004; Holter e Scholtz, 2007).

A subfamília Scarabaeinae é extremamente diversa no Brasil, com aproximadamente 786 espécies descritas, distribuídas em 69 gêneros, sendo 43 espécies registradas apenas no estado da Bahia (CTFB, 2024). Esses besouros estão amplamente distribuídos em diferentes ecossistemas e apresentam elevada diversidade taxonômica e funcional (Slade et al., 2011). Além disso, são sensíveis a perturbações ambientais e respondem a gradientes ecológicos, o que os torna excelentes bioindicadores da qualidade ambiental (Nichols et al., 2007; França et al., 2020; Souza et al., 2020).

Apesar do nome popular, nem todos os besouros rola-bostas formam "bolas" de esterco para transporte. O esterco é utilizado tanto como recurso alimentar quanto para reprodução. Além disso, algumas espécies se alimentam de carcaças, fungos e frutos em decomposição (Davis et al., 1993), enquanto outras apresentam hábitos predatórios, consumindo miriápodes (Larsen et al., 2009; Sánchez-Hernández e del Campo, 2023) ou formigas do gênero *Atta* (Silveira et al., 2006; Araújo et al., 2015). Recentemente, foi registrada a manipulação de esterco de aves por *Canthidium cf. gracilipe* (Salomão et al., 2024).

Os besouros rola-bostas podem ser classificados em quatro grupos principais de acordo com a forma como manipulam e utilizam os recursos (Nichols et al., 2008): roladores (telecoprídeos), que formam bolas de esterco e as transportam para locais subterrâneos distantes; moradores (endocoprídeos), que vivem e se alimentam dentro ou logo abaixo da pilha de esterco; tuneleiros (paracoprídeos), que cavam túneis abaixo do esterco para depositar suas larvas; e cleptocoprídeos (cleptoparasitas), que roubam excrementos enterrados por outras espécies para fins reprodutivos (Davis et al., 1993). Essas características, aliadas à existência de chaves taxonômicas atualizadas, fazem desse grupo um excelente táxon focal em estudos ecológicos (Nichols e Gardner, 2011).

Além de sua importância na estruturação de comunidades ecológicas, os besouros rola-bostas desempenham funções essenciais nos ecossistemas terrestres (Nichols et al., 2008). Esses

insetos promovem a bioturbação (mistura e deslocamento de sedimentos), fertilizam o solo e realizam a dispersão secundária de sementes (Slade et al., 2007; Maldonado et al., 2019). Eles facilitam a ciclagem de nutrientes ao movimentar matéria orgânica e sedimentos entre a serapilheira e o solo (Tixier et al., 2015; Slade et al., 2011, 2016), beneficiando diretamente a fauna edáfica e favorecendo a absorção de nutrientes pelas plantas (Manning et al., 2016; Keller et al., 2022). Além disso, ao enterrarem matéria orgânica, contribuem para o controle de pragas agrícolas e zoonoses (Yamada et al., 2007; Tixier et al., 2015; Piccini et al., 2017).

Dado o papel indispensável desses besouros para a manutenção dos processos ecológicos, estudos sobre sua diversidade são fundamentais para embasar estratégias de conservação (Scudder, 2017). No entanto, ainda há muitas lacunas no conhecimento sobre a fauna de besouros rola-bostas na Mata Atlântica do sul da Bahia. Embora essa região apresente alta biodiversidade, inventários abrangentes da diversidade taxonômica e funcional desse grupo ainda são escassos (Pinto Leite et al., 2018; Souza et al., 2020; Reis et al., 2023)

OBJETIVO

Analizar a composição das assembleias de besouros rola-bostas (Scarabaeinae) e como elas respondem ao impacto antrópico no sul e extremo sul da Bahia.

Objetivos Específicos

- i) Avaliar a composição, riqueza e diversidade funcional das assembleias de besouros rola-bostas em diferentes categorias de impacto antrópico;
- ii) Identificar as espécies que ocorrem em cada categoria de impacto antrópico.

METODOLOGIA

Área de estudo

O estudo foi realizado no bioma Mata Atlântica, especificamente nos municípios do sul e extremo sul da Bahia, uma região de alta biodiversidade e endemismo para diversos grupos biológicos, incluindo besouros rola-bostas (Scarabaeinae) (Silva & Vaz-de-Mello, 2020). Além de ser considerada um centro de endemismo para esses besouros, a região abriga espécies endêmicas de plantas, anfíbios, répteis e primatas (Thomas et al., 1998; Ostroski et al., 2020; Rojas-Padilla et al., 2020; Ferreira et al., 2024). Essa porção da Mata Atlântica combina altos potenciais de

armazenamento de carbono com menores níveis de perturbação, tornando-se uma área estratégica para ações de conservação e restauração ambiental (Rezende et al., 2018; de Lima et al., 2020a).

O clima da região é classificado como *Af* (quente e úmido) segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com temperatura média de 24°C e precipitação média anual de 1.500 mm. Apesar da ausência de uma sazonalidade definida, há um período de seca caracterizado por temperaturas mais elevadas e menor índice pluviométrico entre os meses de dezembro e março. Devido à pressão antrópica, as mudanças no uso da terra durante as últimas décadas transformaram a floresta nativa em um mosaico de vegetação, que inclui fragmentos de florestas maduras e secundárias, Cabrucas, seringais, plantações de *Eucalyptus spp.* e pastagens (Cassano et al., 2009; Pardini et al., 2009). Essa heterogeneidade ambiental permite avaliar como os besouros rola-bostas respondem a diferentes gradientes de impacto antrópico.

Coletas dos espécimes

As coletas de besouros rola-bostas foram realizadas em quatro municípios, durante os meses de abril a julho do ano de 2022, período sem sazonalidade marcante para a região. As cinco localidades estão inseridas em meio a remanescentes florestais de Mata Atlântica no sul e extremo sul da Bahia (Fig. 1).

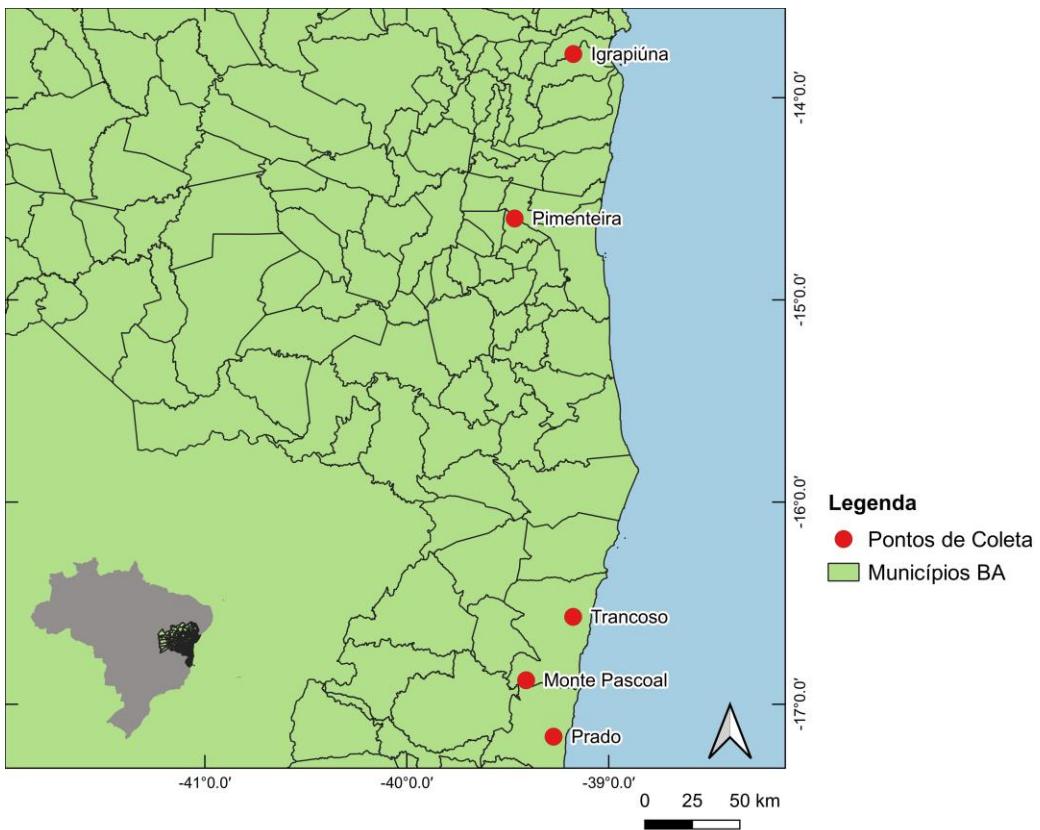


Figura 1. Mapa da região sudeste da Bahia mostrando a localização das cinco localidades amostradas para a coleta de besouros rola-bostas.

Seleção dos Pontos Amostrais

A coleta foi realizada em quatro municípios do sul e extremo sul da Bahia, abrangendo cinco localidades com distintos níveis de impacto antrópico:

- Reserva Ecológica Michelin (Igrapiúna) – Floresta secundária e agrofloresta (seringais e cabrucas).
- Cumuruxatiba (Prado) – Fragmentos florestais e mata ciliar, cercados por pastagens e plantações de eucalipto.
- Pimenteira (Ilhéus) – Áreas em regeneração natural dentro da Fazenda Cachoeira da Serra.
- Fazenda Symbiosis (Trancoso, Porto Seguro) – Áreas destinadas à restauração e cultivos madeireiros.
- Parque Nacional e Histórico do Monte Pascoal (Porto Seguro) – Áreas de floresta preservada.

Categorias de impacto antrópico

Cada ponto de coleta foi categorizado conforme o nível de degradação ambiental, considerando estrutura da vegetação, uso do solo e proximidade de áreas antrópicas. As categorias definidas foram:

- Áreas antropizadas (ex.: pastagens, cultivos exóticos);
- Áreas de regeneração inicial (ex.: vegetação secundária recente);
- Cabruças abandonadas (ex.: agrofloresta sem manejo ativo);
- Áreas de regeneração secundária (ex.: fragmentos em estágios intermediários de sucessão);
- Áreas preservadas (ex.: remanescentes florestais pouco impactados)
- [Mapa interativo de cada unidade amostral.](#)

Tabela 1. Informações gerais sobre os dezesseis locais amostrados para a coleta dos espécimes.

Amostra	Localidade	Cidade	Latitude	Longitude	Elevação	Nível de impacto antrópico	Índice Cobertura de dossel
1	R. Michelin	Igrapiúna	-13.7839	-39.1757	110	Regeneração inicial	69.2
2	R. Michelin	Igrapiúna	-13.7840	-39.1751	106	Preservada	67.0
3	R. Michelin	Igrapiúna	-13.7843	-39.1747	105	Regeneração secundária	69.6
4	R. Michelin	Igrapiúna	-13.7811	-39.1664	52	Antropizada	65.5
5	R. Michelin	Igrapiúna	-13.8151	-39.1505	49	Antropizada	70.6
6	R. Michelin	Igrapiúna	-13.8157	-39.1498	41	Antropizada	59.3
7	Cumuruxatiba	Prado	-17.1555	-39.2508	55	Antropizada	67.8
8	Cumuruxatiba	Prado	-17.1629	-39.2735	59	Preservada	65.4
9	Cabruca abandonada	Pimenteira	-14.5917	-39.4666	200	Cabruca abandonada	62.6
10	Cabruca abandonada	Pimenteira	-14.5911	-39.4665	215	Cabruca abandonada	67.0
11	Symbiosis	Trancoso	-16.5691	-39.1775	54	Antropizada	75.3
12	Symbiosis	Trancoso	-16.5639	-39.1728	39	Regeneração inicial	63.6
13	Symbiosis	Trancoso	-16.5685	-39.1676	74	Regeneração secundária	60.3
14	Parque Nacional do Monte Pascoal	Porto Seguro	-16.8848	-39.4137	172	Preservada	71.1
15	Parque Nacional do Monte Pascoal	Porto Seguro	-16.8837	-39.4135	168	Preservada	74.3
16	Parque Nacional do Monte Pascoal	Porto Seguro	-16.8825	-39.4120	165	Preservada	61.1

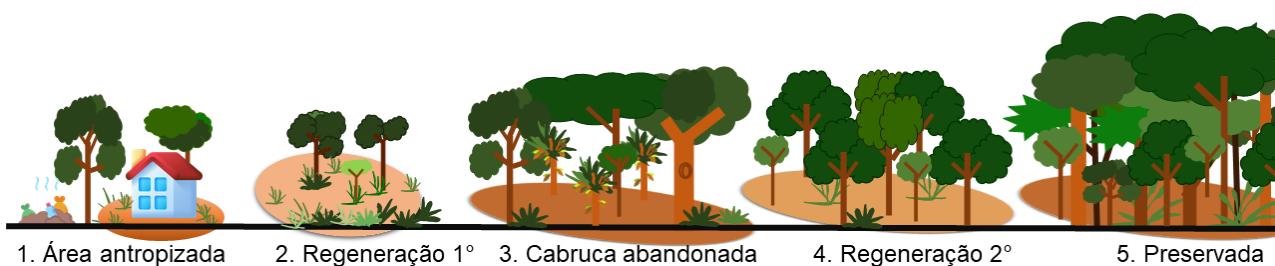


Figura 2. Ilustração da categorização de impacto antrópico para a coleta de espécimes de besouros rola-bostas no sul e extremo sul da Bahia.

Cobertura de dossel

Utilizamos a cobertura de dossel, calculada através da função Índice de Cobertura de Dossel CaCo do software GLAMA – Gap Light Analysis Mobile Application (Fig. 3), como uma medida complementar da categorização das áreas amostradas. O índice de cobertura de dossel é um método rápido e robusto para uma estimativa precisa da cobertura de dossel, comparável à estimativa visual da cobertura de dossel, mas não afetada pelo viés do observador (Tichý, 2016). A foto para análise de cobertura do dossel foi retirada em cada ponta de um triângulo com 2 metros de lado, em cada quina foi disposta uma armadilha. A foto foi tirada a 1 metro de altura, totalizando três fotos por unidade amostral (i.e., armadilha). O índice é calculado no local a partir de fotografias hemisféricas. Para a análise de dados, utilizamos a média do índice de cobertura de dossel das três fotos por armadilha.

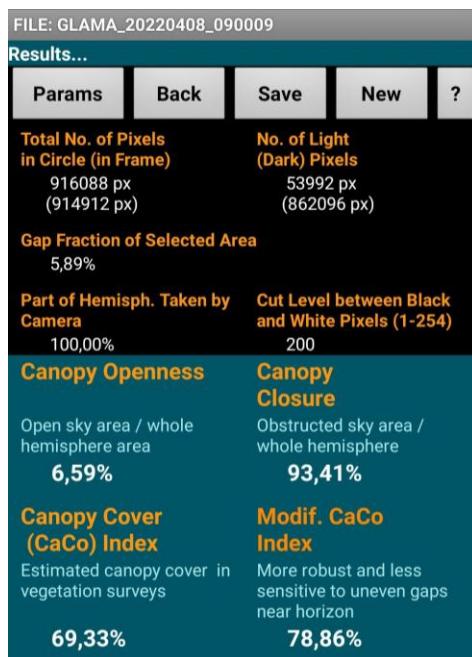


Figura 3. Exemplo dos parâmetros mensurados pelo software GLAMA a partir de fotografia hemisférica do dossel.

Amostragem da diversidade de besouros rola-bostas

A coleta de besouros rola-bostas foi realizada utilizando armadilha de “isca” tipo *pitfall*

(recipiente plástico de 1 litro). Em cada local de coleta foi montada uma armadilha composta por três *pitfalls*, um em cada quina de um triângulo de 2 m de lado. Os *pitfalls* foram dispostos à altura do solo (Fig. 4). As armadilhas foram espaçadas irregularmente entre diferentes ambientes, respeitando intervalos mínimos de 100 m, a fim de alcançar a independência dos pontos amostrais. O uso de três *pitfalls* por armadilha teve o objetivo de otimizar o número de capturas e minimizar as consequências de uma potencial perda de armadilhas (Braga et al., 2013). Em cada *pitfall* foi colocado esterco humano (Marsh et al., 2013) em um recipiente plástico de 50 ml, suspenso com o auxílio de vareta de bambu. No *pitfall* foram adicionados 250 ml de uma solução de sal e detergente para evitar a fuga de besouros até a coleta.

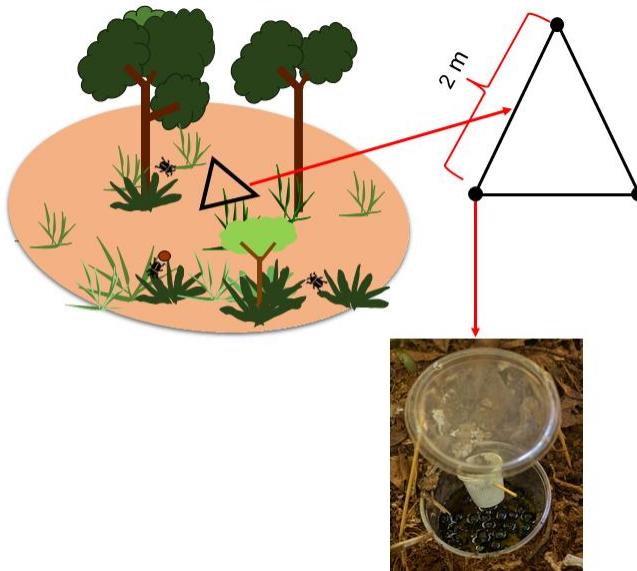


Figura 4. Ilustração da disposição da armadilha composta em campo.

As armadilhas ficaram expostas pelo período de 24 horas no campo. Após esse período, o líquido presente nos *pitfalls* foram peneirados todos os besouros presentes em cada *pitfall*, tanto no líquido quanto no recipiente plástico com a isca, foram acondicionados em potes previamente identificados em solução de álcool 70%. As amostras foram lavadas novamente em campo com álcool 70% visando uma melhor conservação dos espécimes. Após cada coleta, as amostras foram conduzidas ao Laboratório de Mirmecologia do Centro de Pesquisas do Cacau – CEPEC-CEPLAC para triagem.

Na triagem inicial, os espécimes de besouros foram limpos em álcool 70%. Espécimes maiores foram alfinetados e espécimes menores foram dispostos em manta de algodão,

posteriormente secos em estufa a 70 °C por 48 horas. Em alguns casos, devido a umidade local, esse período de secagem em estufa foi estendido para 72 horas. Após a secagem dos espécimes, eles foram dispostos em caixas entomológicas. Todos os indivíduos coletados foram contabilizados e identificados ao menor nível taxonômico possível utilizando lupa Leica modelo EZ4, e com o auxílio de chaves taxonômicas (Vaz-de-Mello et al., 2011, 2017; Huijbregts and Krikken, 2012; Tissiani et al., 2017; Maldaner et al., 2018, 2024; Cassenote et al., 2020; Mota et al., 2023a). Sempre que necessário, consultamos o taxonomista Dr. Fernando Zagury Vaz-de-Mello, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil. Espécimes não identificados ao nível de espécie foram morfoespeciados para fins de análise posterior.

Finalmente, todos os indivíduos coletados foram classificados em grupos funcionais de acordo com sua estratégia de realocação de recursos descrita na literatura. Este atributo está relacionado à manipulação de esterco para alimentação e reprodução (Halffter and Edmonds, 1983) (Fig. 5). As espécies foram agrupadas da seguinte forma:

- Telecoprideos: formam bolas de recursos e as rolam até uma certa distância da área original de esterco.
- Endocoprideos: permanecem dentro das áreas de recursos.
- Paracoprideos: cavam túneis no solo imediatamente abaixo ou muito perto do recurso.
- Cleptocoprideos: roubam uma pilha (porção) de esterco de outra espécie (telecoprídea) (Halffter and Edmonds, 1983; Davis et al., 1993).

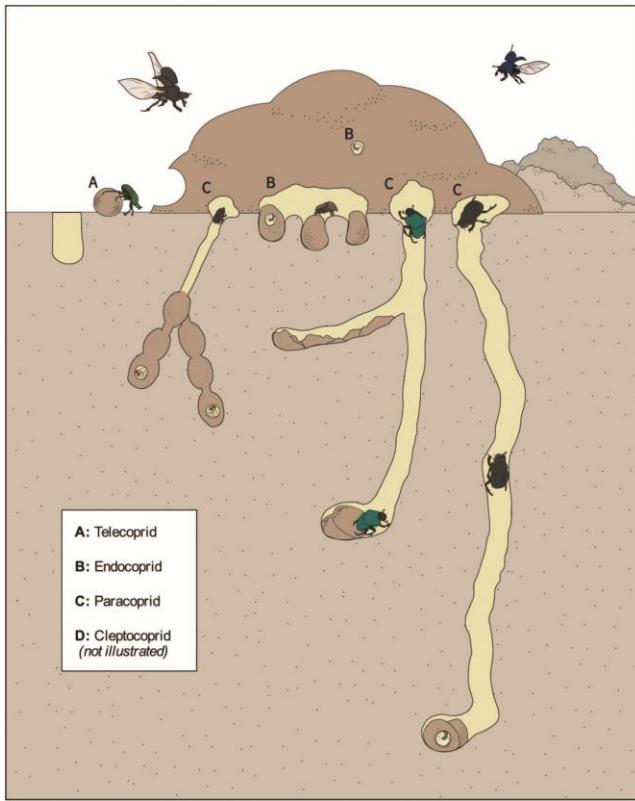


Figura 5. Grupos funcionais de besouros rola-bostas com base no comportamento de manipulação e nidificação, adaptado de Maldaner et al. (2024).

Análise de dados

Todas as análises foram conduzidas no ambiente R versão 4.3.3. Utilizamos funções do pacote "vegan" (Oksanen et al., 2024), para estimativas de diversidade, rarefação e análise de diversidade beta. Construímos Modelos Lineares Generalizados (GLMs) com distribuição de erros adequada, considerando como variáveis resposta a riqueza e a abundância de besouros, e como variáveis explicativas as categorias de impacto antrópico e o índice de cobertura de dossel (CaCo). Também utilizamos GLMs para testar o efeito das categorias de impacto antrópico e dos grupos funcionais sobre a abundância dos besouros.

A diversidade- β foi avaliada utilizando o índice de Sorensen, considerando seus componentes de substituição (turnover) e aninhamento (nestedness). Para isso, calculamos a dissimilaridade entre as assembleias amostradas a partir de uma matriz de presença-ausência, empregando a função beta.pair do pacote “betapart” (Baselga and Orme, 2012). Os componentes da diversidade- β foram visualizados por meio de mapas de calor gerados com o pacote

“ggplot2”, permitindo identificar padrões de variação na composição de espécies entre amostras. Para testar diferenças na composição das assembleias em função do impacto antrópico, realizamos uma análise de variância permutacional (PERMANOVA) utilizando a métrica de Bray-Curtis.

A PERMANOVA foi conduzida por meio da função adonis2, considerando a matriz de presença-ausência como variável resposta e a categoria de impacto antrópico como variável explicativa. Adicionalmente, realizamos uma Análise de Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS) baseada na distância de Bray-Curtis para visualizar a distribuição das assembleias em um espaço multidimensional. Essa análise permite identificar padrões de agrupamento entre amostras e verificar se há segregação em função dos fatores ambientais. A fim de avaliar a relação entre a dissimilaridade na composição de espécies e variáveis ambientais, aplicamos o teste de correlação de Mantel, utilizando a distância da diversidade beta total (Sorensen) e a cobertura vegetal das áreas amostradas. Esse teste avalia a significância da associação entre a estrutura da comunidade e as condições ambientais, auxiliando na compreensão dos fatores que influenciam a distribuição das espécies. Por fim, realizamos uma análise de agrupamento hierárquico (clusterização) com o método de encadeamento médio (“average linkage”) para identificar possíveis padrões de similaridade entre as assembleias.

RESULTADOS

Coletamos 1252 indivíduos pertencentes a 55 espécies distribuídas em 14 gêneros. Dentre eles, um exemplar do gênero *Spodochlamys* (Scarabaeidae: Rutelinae), embora não pertença aos Scarabaeinae, a espécie possui o hábito coprófago, sendo descrita como rola-bosta (Kobayashi and Ratcliffe 2023) e, portanto, a espécie foi inclusa nas análises. O gênero *Onthophagus* foi o mais abundante com 537 indivíduos distribuídos em três espécies, seguido por *Dichotomius* com 256 indivíduos, distribuídos em 15 espécies. O gênero *Canthidium* foi o terceiro mais abundante com 152 indivíduos. As espécies *Dichotomius iannuzziae* (Valois, Vaz-de-Mello & Silva, 2017) e *Onthophagus* sp.1 foram coletadas em todos os ambientes, alterando a sua abundância entre as diferentes categorias de impacto antrópico. *Onthophagus* sp.1 exibiu 166 indivíduos nos ambientes antropizados, 287 em ambientes de regeneração inicial, 104 em Cabruas abandonadas, 17 em regeneração secundária e 372 indivíduos nos ambientes preservados. Amostramos algumas espécies com apenas um indivíduo: *Coprophanaeus bellicosus* (Olivier, 1789) ♀ (Fig. 6) na área

preservada em Cumuruxatiba; *Spodochlamys* sp.1 e *Phanaeus palaeno* (Blanchard, 1845) na área de regeneração inicial na Reserva Michelin; e *Deltochilum brasiliense* (Castelnau, 1840) e *Dichotomius fimbriatus* (Harold, 1869) na área preservada do Parnaíba M. Pascoal. Das 55 espécies de besouros rola-bostas amostradas, encontramos espécies descritas como pertencentes aos quatro grupos funcionais, sendo 64% de besouros de hábito paracoprídeo, 16% de telecoprídeo, 13% de endocoprídeo e 7% de cleptocoprídeo (Tab. 2).



Figura 6. *Coprophanaeus bellicosus* (Olivier, 1789) ♀, coletado em mata ciliar no distrito de Cumuruxatiba, município Prado, Bahia, Brasil. O espécime foi utilizado no curso de identificação prática de Scarabaeinae americanos e em seguida foi depositado na coleção entomológica Coleção Entomológica de Mato Grosso Eurides Furtado-CEMT.

Tabela 2. Espécies de besouros rola-bostas e suas respectivas abundâncias coletados nas cinco categorias de impacto antrópico.

Espécie/morfoespécies	Grupo funcional	Abundância por categoria de impacto antrópico (nº de indivíduos)				
		Antropizada	Cabruca	Preservada	Regeneração inicial	Regeneração secundária
<i>Agamopus</i> sp.1	Cleptocoprídeo	0	0	9	2	4
<i>Agamopus</i> sp.2	Cleptocoprídeo	0	0	15	0	0
<i>Agamopus</i> sp.3	Cleptocoprídeo	0	0	16	0	0
<i>Agamopus unguicularis</i> (Harold, 1883)	Cleptocoprídeo	0	1	4	1	2
<i>Ateuchus</i> sp.1	Paracoprídeo	1	2	4	1	1
<i>Canthidium</i> sp.1	Paracoprídeo	2	0	59	0	2
<i>Canthidium</i> sp.2	Paracoprídeo	3	0	20	0	1
<i>Canthidium</i> sp.3	Paracoprídeo	2	0	11	0	2
<i>Canthidium</i> sp.4	Paracoprídeo	0	0	1	0	1
<i>Canthidium</i> sp.5	Paracoprídeo	2	0	0	0	2
<i>Canthidium</i> sp.6	Paracoprídeo	17	0	2	2	4
<i>Canthidium</i> sp.7	Paracoprídeo	0	0	2	0	2
<i>Canthidium</i> sp.9	Paracoprídeo	9	0	0	0	0
<i>Canthidium</i> sp.10	Paracoprídeo	0	0	2	0	1
<i>Canthidium</i> sp.11	Paracoprídeo	0	0	0	0	3
<i>Canthon (Peltecanthon) haroldi</i> (Harold, 1867)	Telecoprídeo	2	0	13	0	10
<i>Canthon (Peltecanthon) staigi</i> (Pereira, 1953)	Telecoprídeo	40	17	34	0	17
<i>Canthon</i> sp.1	Telecoprídeo	1	0	0	0	0
<i>Canthon</i> sp.2	Telecoprídeo	1	0	0	0	1
<i>Canthon</i> sp.3	Telecoprídeo	2	1	1	0	0
<i>Coprophanaeus bellicosus</i> (Olivier, 1789)	Paracoprídeo	0	0	1	0	0
<i>Coprophanaeus dardanus</i> (MacLeay, 1819)	Paracoprídeo	0	0	2	1	1
<i>Deltochilum brasiliense</i> (Castelnau, 1840)	Paracoprídeo	0	0	1	0	0
<i>Dichotomius fimbriatus</i> (Harold, 1869)	Paracoprídeo	0	0	1	0	0
<i>Dichotomius gilletti</i> (Valois, Vaz-de-Mello & Silva, 2017)	Paracoprídeo	4	0	8	1	0
<i>Dichotomius iannuzziae</i> (Valois, Vaz-de-Mello & Silva, 2017)	Paracoprídeo	32	12	48	34	49
<i>Dichotomius irinus</i> (Harold, 1867)	Paracoprídeo	0	2	2	0	0

<i>Dichotomius laevicollis</i> (Felsche, 1901)	Paracoprídeo	0	0	0	0	2
<i>Dichotomius longiceps</i> (Taschenberg, 1870)	Paracoprídeo	0	0	0	1	0
<i>Dichotomius mormon</i> (Ljungh, 1799)	Paracoprídeo	3	4	0	7	2
<i>Dichotomius nisus</i> (Olivier, 1789)	Paracoprídeo	0	0	0	2	2
<i>Dichotomius sericeus</i> (Harold, 1867)	Paracoprídeo	1	0	9	0	0
<i>Dichotomius</i> sp.1	Paracoprídeo	0	1	5	0	0
<i>Dichotomius</i> sp.2	Paracoprídeo	0	0	0	0	1
<i>Dichotomius</i> sp.3	Paracoprídeo	0	0	13	0	0
<i>Dichotomius</i> sp.4	Paracoprídeo	0	0	7	0	0
<i>Dichotomius</i> sp.5	Paracoprídeo	1	0	0	0	0
<i>Dichotomius</i> sp.6	Paracoprídeo	0	0	2	0	0
<i>Eurysternus caribaeus</i> (Herbst, 1789)	Endocoprídeo	12	1	0	0	3
<i>Eurysternus deplanatus</i> (Germar, 1824)	Endocoprídeo	2	0	0	0	0
<i>Eurysternus jessopi</i> (Martinez, 1988)	Endocoprídeo	3	0	0	2	0
<i>Eurysternus nigrovirens</i> (Génier, 2009)	Endocoprídeo	0	0	7	0	1
<i>Eurysternus parallelus</i> (Castelnau, 1840)	Endocoprídeo	0	0	6	0	2
<i>Eurysternus</i> sp.1	Endocoprídeo	0	0	1	0	1
<i>Eurysternus</i> sp.2	Endocoprídeo	0	0	1	0	0
<i>Ontherus</i> sp.1	Paracoprídeo	0	0	20	1	4
<i>Ontherus</i> sp.3	Paracoprídeo	0	0	0	0	7
<i>Onthophagus</i> sp.1	Telecoprídeo	166	50	26	225	42
<i>Onthophagus</i> sp.2	Telecoprídeo	2	11	3	4	4
<i>Onthophagus</i> sp.3	Telecoprídeo	4	0	0	0	0
<i>Oxysternon palemo</i> (Castelnau, 1840)	Paracoprídeo	0	1	1	0	0
<i>Phanaeus palaeno</i> (Blanchard, 1845)	Paracoprídeo	0	0	0	1	0
<i>Phanaeus splendidulus</i> (Fabricius, 1781)	Paracoprídeo	1	1	10	0	0
<i>Spodochlamys</i> sp.1	Paracoprídeo	1	0	5	1	1
<i>Streblopus opatroides</i> (Van Lansberge, 1874)	Telecoprídeo	0	0	0	1	0

Riqueza de besouros rola-bostas

A riqueza total de besouros rola-bostas amostradas neste estudo representa 79% da riqueza estimada através dos índices Chao, Jackknife 1, Jackknife 2 e Bootstrap ($n = 69$) para as localidades. Além disso, as curvas de rarefação indicam que o esforço amostral foi suficiente para os ambientes Antropizado e Preservado (Fig. 7a); no entanto, para os ambientes Cabruca abandonada, Regeneração inicial (Regeneração 1) e secundária (Regeneração 2), as curvas não atingiram a assíntota (Fig. 7b). Geralmente amostragens de invertebrados nos trópicos não atingem a assíntota, uma vez que amostramos uma participação da diversidade. No entanto, no presente estudo, a assíntota não foi atingida devido ao N amostral insuficiente para as categorias de impacto antrópico Cabruca e Regeneração 1.

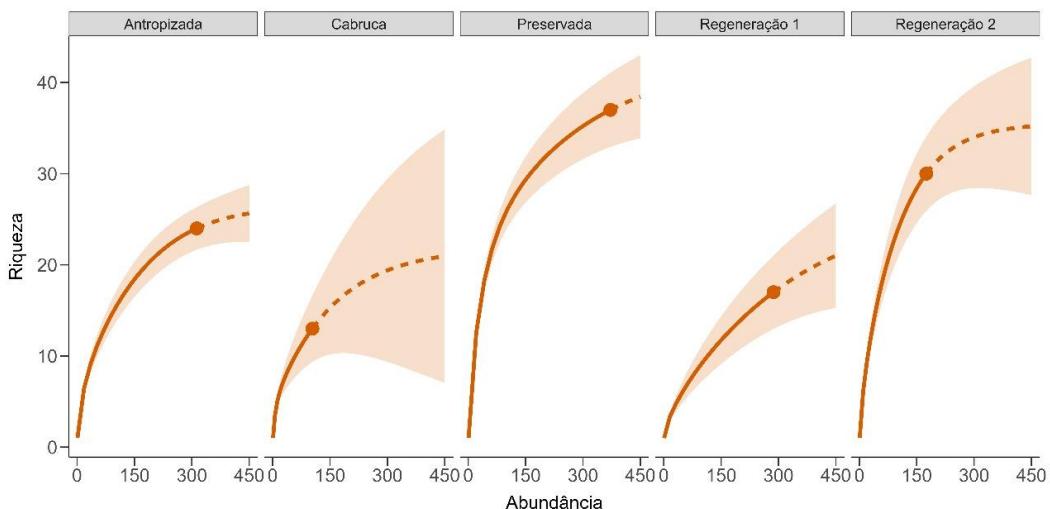


Figura 7a. Curvas de rarefação da amostragem de besouros rola-bostas coletados nas diferentes categorias de impacto antrópico no sul e extremo sul da Bahia.

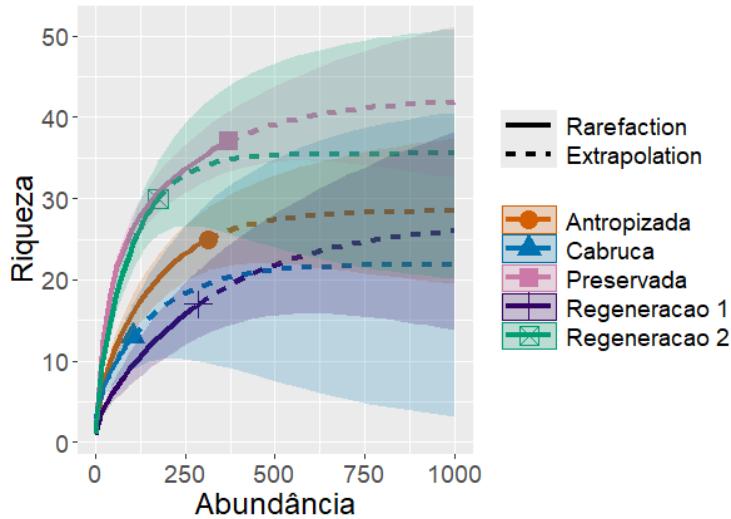


Figura 7b. Curvas de rarefação e extrapolação agrupadas da amostragem de besouros rola-bostas coletados nas diferentes categorias de impacto antrópico no sul e extremo sul da Bahia.

Os diferentes tipos de categorias de impacto antrópico (cobertura do solo) (antropizada, regeneração, preservada) têm impactos distintos na riqueza de besouros rola-bostas ($p = 0.046$). O ambiente que apresentou maior riqueza de espécies de besouros rola-bostas foi a área categorizada como preservada dentro do Parque Nacional Monte Pascoal. Não encontramos relação significativa entre a riqueza de besouros e o índice de cobertura de dossel CaCo ($p = 0.866$).

Dentre as categorias de impacto antrópico, as duas Cabrucas abandonadas foram as áreas que apresentaram menor riqueza de espécies, a primeira exibiu 12 espécies de besouros rola-bostas, e a segunda com apenas um indivíduo de *Phanaeus splendidulus* (Fabricius, 1781). Ambientes de regeneração secundária e preservados apresentaram maior riqueza de besouros rola-bostas, enquanto que áreas categorizadas como antropizadas em Cumuruxatiba, Symbiosis e na Reserva Michelin apresentaram menor riqueza (Fig. 8). Não encontramos nenhuma espécie de besouro rola-bosta na área categorizada como regeneração inicial nas dependências da empresa Symbiosis.

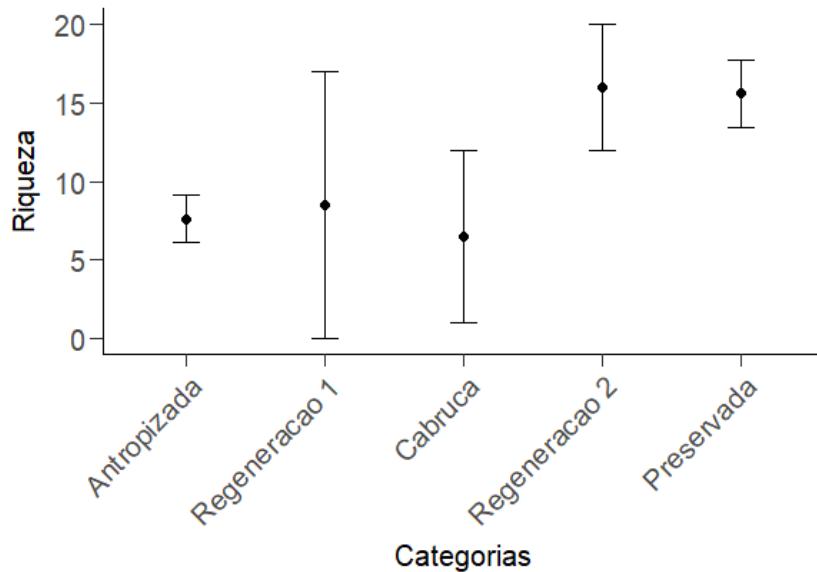


Figura 8. Distribuição da riqueza de besouros rola-bostas em ambientes com diferentes categorias de impacto antrópico no sul e extremo sul da Bahia, Brasil.

Abundância de besouros rola-bostas

A Reserva Michelin e o Parque Nacional do Monte Pascoal foram os ambientes com maior cobertura florestal local e no entorno, e apresentaram a maior abundância de besouros rola-bostas, com 731 e 280 indivíduos, respectivamente (Fig. 8). A maior abundância de besouros rola-bostas encontrada estava distribuída na área de regeneração inicial com 298 besouros distribuídos em 17 espécies, seguida pela área antropizada com 176 indivíduos pertencentes a 13 espécies, ambas as áreas dentro da Reserva Michelin. No entanto, não encontramos uma relação significativa entre a abundância de besouros rola-bostas e o índice de cobertura de dossel CaCo ($p > 0.05$). Além disso, a abundância de besouros também não foi afetada pela categoria de impacto antrópico ($p > 0.05$).

Padrões de diversidade- β e estrutura das comunidades

A análise da diversidade beta revelou variações na composição de espécies entre as áreas amostradas. O dendrograma gerado pelo agrupamento hierárquico das amostras (Fig. 9) indica a formação de grupos distintos, sugerindo padrões de similaridade na composição das assembleias ao longo do gradiente ambiental de áreas categorizadas como preservadas até áreas categorizadas como antropizadas. Amostras mais próximas refletem comunidades ecologicamente semelhantes, como por exemplo as amostras 14 e 16 ambas áreas categorizadas como áreas preservadas,

enquanto a separação de determinados grupos sugere a influência de fatores ambientais sobre a distribuição das espécies.

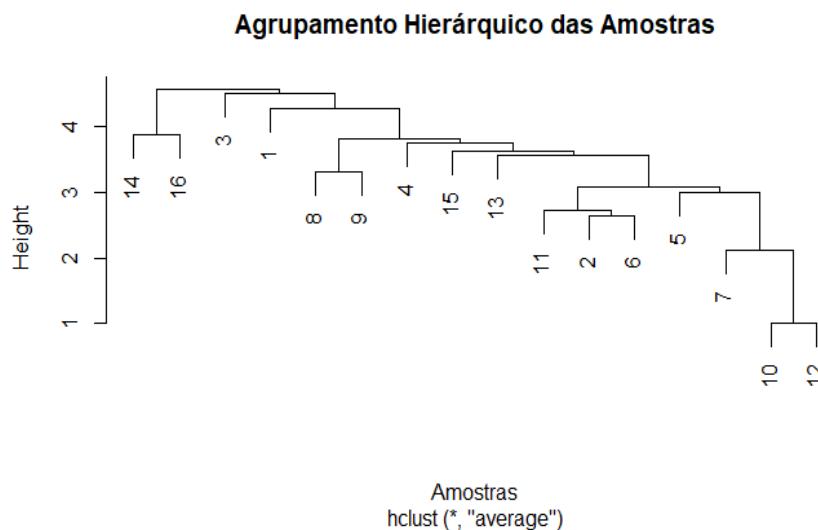


Figura 9. Agrupamento hierárquico das amostras com base na composição de espécies.

A análise da diversidade- β total (Fig. 10) demonstrou elevados níveis de dissimilaridade entre algumas amostras, evidenciados pelos tons mais intensos no mapa de calor. Esses resultados sugerem que a heterogeneidade ambiental entre os locais influencia a estrutura das comunidades, promovendo diferenças na composição das espécies de besouros rola-bostas.

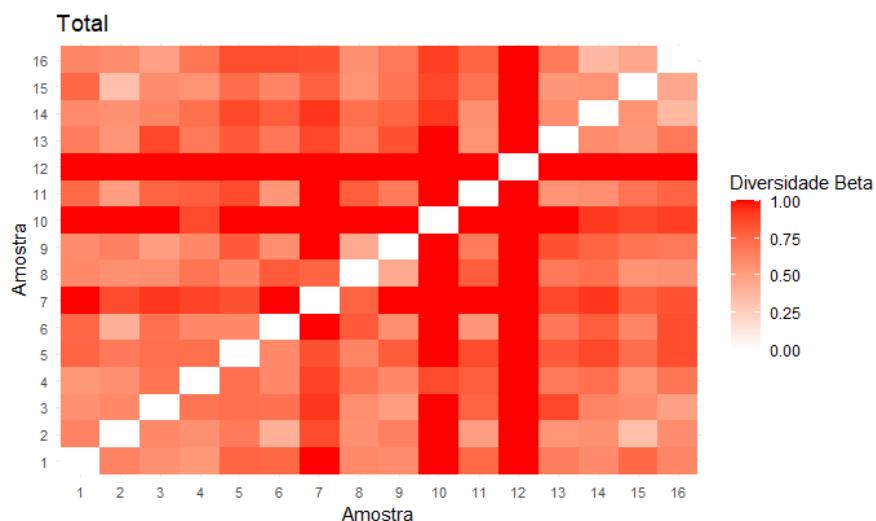


Figura 10. Gráfico da diversidade- β entre as áreas amostradas. O mapa de calor indica o grau de dissimilaridade entre as amostras, onde cores mais intensas representam maior variação na composição de espécies.

Ao decompormos a diversidade- β em seus componentes, observamos que a substituição de espécies (*turnover*) desempenha um papel significativo na diferenciação das assembleias de besouros rola-bostas (Fig. 11). As áreas com maior intensidade de substituição indicam que a variação na composição das espécies ocorre principalmente devido à troca de espécies entre amostras, em vez de uma simples perda de espécies. Esse padrão pode estar relacionado a gradientes ambientais das categorias de impacto antrópico, como diferenças na qualidade do habitat ou variações nos regimes de perturbação. Por outro lado, o componente de aninhamento (*nestedness*) (Fig. 12) reflete a perda de espécies ao longo das amostras, sugerindo que algumas assembleias de besouros rola-bostas representam subconjuntos de assembleias mais ricas. Esse padrão pode estar associado a processos de degradação ambiental devido aos impactos antrópicos, onde habitats menos complexos sustentam um número reduzido de espécies, ou ainda a processos de colonização e extinção dentro da paisagem estudada.

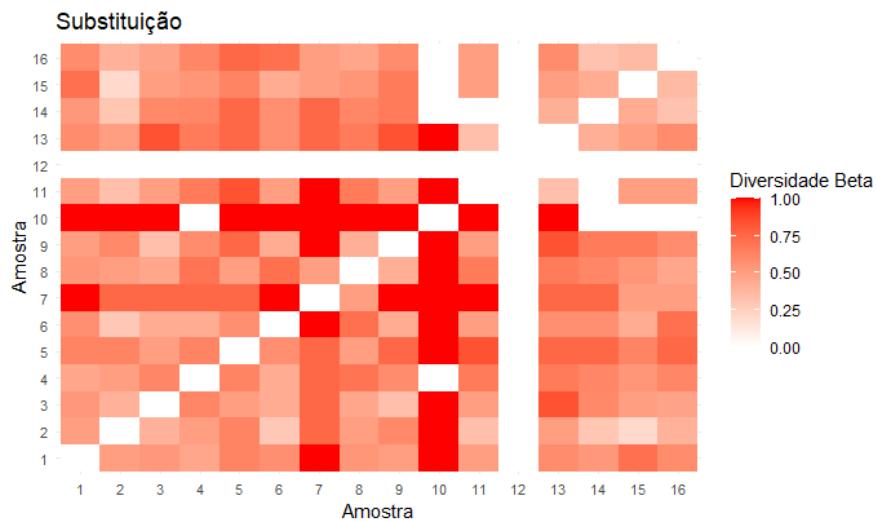


Figura 11. Componente de substituição (*turnover*) da diversidade- β . A substituição de espécies entre amostras reflete mudanças na composição da comunidade ao longo do gradiente ambiental.

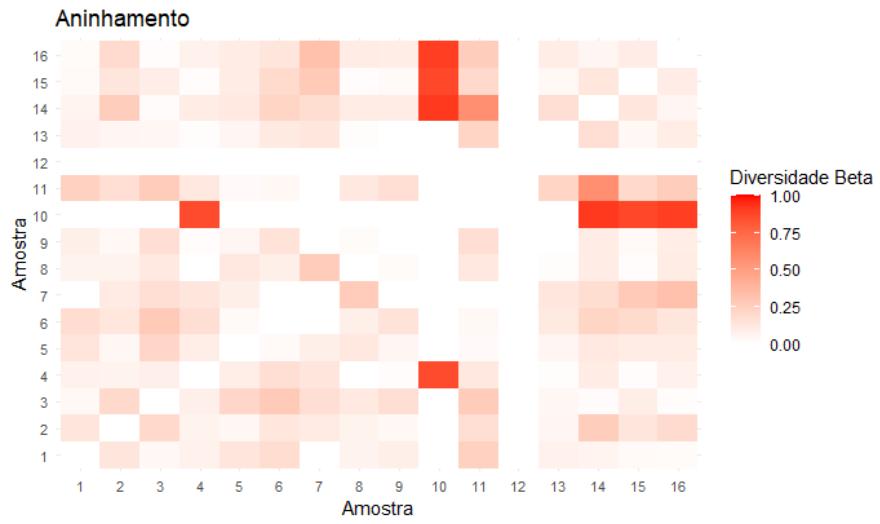


Figura 12. Componente de aninhamento (*nestedness*) da diversidade- β . O padrão de aninhamento sugere que algumas comunidades representam subconjuntos de comunidades mais ricas.

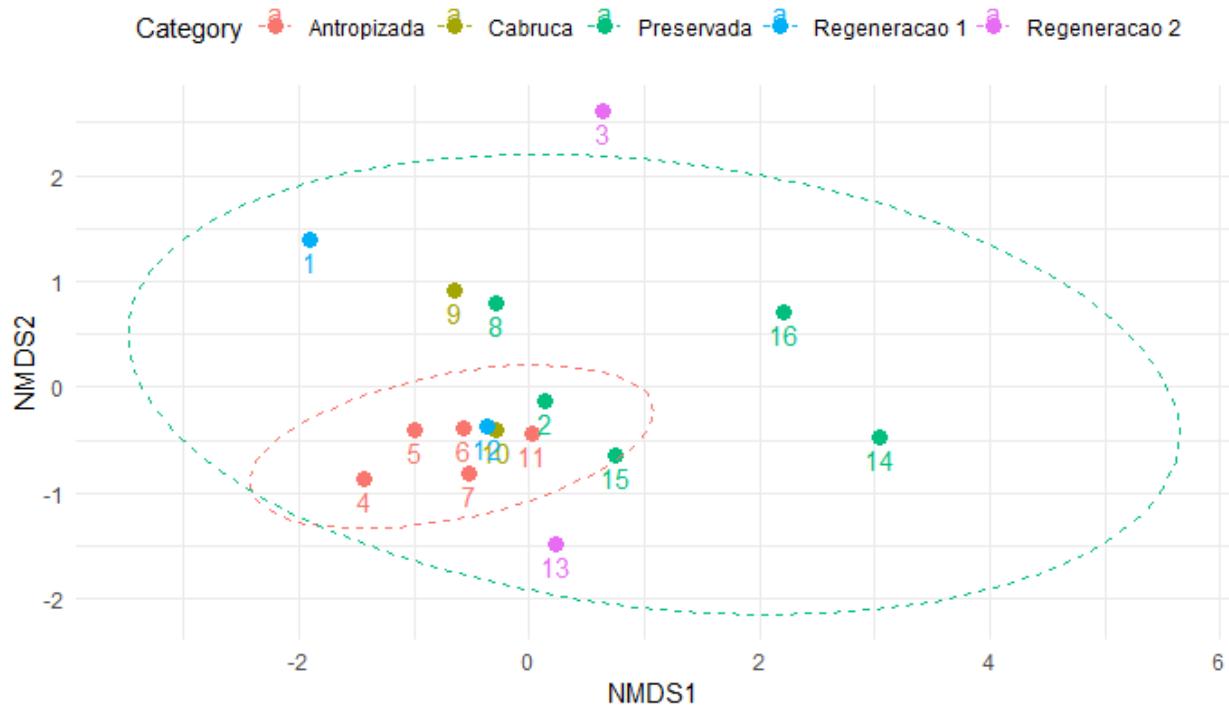


Figura 13. Ordenação NMDS das amostras com base na composição de espécies. A análise NMDS representa a similaridade entre as comunidades amostradas em um espaço bidimensional.

DISCUSSÃO

As áreas destinadas à preservação, particularmente aquelas próximas a florestas pristinas da Mata Atlântica (Resende et al., 2024) e áreas menos antropizadas (regeneração secundária) apresentaram maior riqueza e diversidade funcional de besouros rola-bostas. A cobertura florestal está diretamente relacionada à disponibilidade de recursos (Fahrig, 2013) e manchas inseridas em paisagens altamente florestadas abrigam um elevado número de espécies da fauna e flora (Sandor and Chazdon, 2014; Fahrig, 2020; Morante-Filho et al., 2021). Essa alta riqueza de espécies potencializa a provisão de processos ecológicos fundamentais para o funcionamento dos ecossistemas florestais (Brockhoff et al., 2017). As assembleias de besouros rola-bostas indicam que a cobertura florestal da matriz (Reserva Michelin e Parna Monte Pascoal) atua como uma fonte de espécies para as áreas adjacentes. Isso é particularmente relevante, pois áreas protegidas são mais ricas em espécies de mamíferos, incluindo as ameaçadas, e a maioria dos besouros rola-bostas dependem da fauna para obtenção de alimento (Nichols et al., 2009; Bogoni et al., 2019; Raine and Slade, 2019; Magioli et al., 2021a).

Quando inseridas em uma matriz com cobertura florestal, áreas com maior impacto antrópico abrigaram maior abundância e diversidade de besouros rola-bostas em nosso estudo. Áreas antropizadas, como plantações de seringueira e vilas de operários abandonadas dentro da Reserva Michelin, apresentaram maior riqueza e abundância desses besouros. Outro exemplo da importância da cobertura florestal é uma área de mata ciliar ao redor de um riacho em Cumuruxatiba (ver Tab. 1 amostra 8), onde amostramos treze espécies de besouros rola-bostas (ver Tab. 2). Essa área possivelmente funciona como corredor ecológico para a fauna para hidratação e locomoção, o que pode justificar a presença dessas espécies.

Os besouros do gênero *Coprophanaeus* são conhecidos por seu maior tamanho corpóreo e por serem especialistas em florestas (Davis et al., 1993). De fato, encontramos uma fêmea de *Coprophanaeus bellicosus* (Olivier, 1789) na área preservada (mata ciliar) em Cumuruxatiba e *Coprophanaeus dardanus* (MacLeay, 1819) nas áreas preservadas (dois indivíduos), em regeneração secundária (um indivíduo) e em regeneração inicial (um indivíduo). A menor riqueza e abundância de besouros rola-bostas em paisagens altamente modificadas pelo uso humano foi observada por Braga et al. (2013), Korasaki et al. (2013) e Filgueiras et al. (2015). A modificação da matriz pelo uso antrópico, causa a diminuição de cobertura florestal, alterações microclimáticas e aumento do efeito de borda (Fahrig, 2002), fatores que atuam como filtro biológico para as

espécies de besouros rola-bostas (da Silva and Cassenote, 2019; Souza et al., 2020). As áreas amostrais em Cumuruxatiba estão localizadas próximas ao Parque Nacional do Descobrimento, mas em uma matriz altamente antropizada. Nessas áreas, observamos uma menor riqueza e abundância de besouros em comparação com áreas similares neste estudo. A matriz altamente antropizada em Cumuruxatiba pode ser relacionada à menor diversidade de besouros rola-bostas com a dominância de espécies do gênero *Canthidium*, besouros com menor tamanho corpóreo e especialmente bem adaptados a ambientes perturbados (Davis et al., 1993; Korasaki et al., 2013; Filgueiras et al., 2015).

Pequenos remanescentes florestais podem retardar o processo de perda de espécies a longo prazo (Magioli et al., 2021a). Assim, a preservação dessas manchas de vegetação, mesmo em matriz antrópica, é altamente recomendada para as assembleias de rola-bostas (Aziz and Rasidi, 2014; Souza et al., 2020). Em nosso estudo, áreas categorizadas com algum impacto antrópico, quando inseridas em uma matriz com maior cobertura florestal, apresentaram maior riqueza, abundância e grupos funcionais de besouros rola-bostas do que áreas similares inseridas em uma matriz desmatada. O mesmo efeito foi observado por Sánchez-de-Jesús et al. (2016) e da Silva and Cassenote (2019) em áreas de floresta tropical no México e na zona de transição entre o Pampa e a Mata Atlântica do sul do Brasil.

No site Catálogo Taxonômico da Fauna do Brasil estão listadas 44 espécies de besouros da subfamília Scarabaeinae para o estado da Bahia. Estudos recentes realizados na região encontraram entre 20 e 37 espécies (de Lima et al., 2020b; Reis et al., 2023). Em nosso estudo encontramos 55 espécies (Tab. 2), demonstrando que a diversidade de besouros rola-bostas para o sul e extremo sul da Bahia ainda é subestimada. Sugerimos que novos estudos considerem realizar um levantamento robusto da diversidade de besouros rola-bostas, utilizando maior diversidade de atrativos, com uso simultâneo de outros métodos de coleta como armadilhas de interceptação de voo, e a disposição de armadilhas em dossel.

Para o sul da Bahia, a composição de espécies de besouros rola-bostas em fragmentos florestais dentro de paisagens excessivamente desmatadas é distinta daquela em paisagens onde a floresta é melhor conservada (Souza et al., 2020). Segundo Reis et al. (2023), ambientes mais estruturalmente complexos dentro da Reserva Michelin abrigam maior riqueza e abundância de besouros rola-bostas. Esses resultados apoiam a ideia de que o desmatamento da paisagem atua como um filtro ambiental significativo para as comunidades biológicas, simplificando a

diversidade das assembleias de besouros rola-bostas (Korasaki et al., 2013; da Silva and Cassenote, 2019). Além disso, diversos estudos anteriores evidenciaram que a substituição, fragmentação e degradação de florestas tropicais e subtropicais por usos intensivos e semi-intensivos da terra (como pecuária, plantações de árvores e agricultura) alteram a abundância (Sánchez-de-Jesús et al., 2016; da Silva and Cassenote, 2019), riqueza e composição (da Silva and Cassenote, 2019; Gómez-Cifuentes et al., 2020; Souza et al., 2020) das assembleias de besouros rola-bostas.

A análise da diversidade- β revelou que as assembleias de besouros rola-bostas variam significativamente entre as diferentes categorias de impacto antrópico, reforçando a influência da matriz florestal na composição das comunidades. A substituição de espécies (*turnover*) foi maior entre áreas com maior nível de impacto antrópico, indicando que locais mais preservados abrigam espécies distintas das encontradas em ambientes mais antropizados. Isso sugere que a cobertura florestal atua como um fator estruturante, promovendo a manutenção de espécies mais sensíveis à degradação ambiental. Além disso, a diversidade- β também foi elevada em áreas em regeneração, sugerindo um potencial de recuperação das assembleias ao longo do tempo. Esses achados corroboram estudos prévios que indicam que fragmentos florestais em paisagens altamente desmatadas apresentam composição diferenciada em relação a áreas com maior cobertura vegetal contínua (Souza et al., 2020; Reis et al., 2023), destacando a importância de estratégias de conservação que priorizem a conectividade entre habitats e a proteção de pequenos remanescentes florestais.

Enfatizamos que iniciativas de conservação devem priorizar a redução do desmatamento e da heterogeneidade da matriz ao redor dos remanescentes florestais (Sánchez-de-Jesús et al., 2016). Segundo Vancine et al. (2024), existe apenas 36% de cobertura vegetal natural na Mata Atlântica, com 23% sendo floresta. Entre 2005 e 2020, houve um ganho de 1 milhão de hectares de área florestal, porém mais da metade desse valor resulta do aumento do tamanho de fragmentos já existentes. Alarmantemente, 97% dos fragmentos florestais são pequenos (<50 ha) e 50-60% da vegetação está a menos de 90 metros das suas bordas (Vancine et al., 2024). Portanto, a conservação da diversidade de besouros rola-bostas depende do manejo adequado do uso da terra. Nesse sentido, a priorização espacial de fragmentos remanescentes em uma matriz com cobertura florestal pode ser útil para a tomada de decisões de restauração da Mata Atlântica (Benzeev et al., 2023).

Concluímos que a preservação de áreas florestais, especialmente aquelas adjacentes a florestas pristinas e menos antropizadas, é crucial para manter a riqueza e a diversidade funcional de besouros rola-bostas na Mata Atlântica do sul da Bahia. A cobertura florestal desempenha um papel fundamental na provisão de recursos e na manutenção de processos ecológicos (Faria et al., 2023), influenciando positivamente a diversidade e abundância desses besouros (Souza et al., 2020; Reis et al., 2023), mesmo em áreas com algum impacto antrópico. Áreas com maior cobertura florestal, tais como a Reserva Michelin e o Parna Monte Pascoal, são refúgios importantes para essas espécies, destacando a importância de corredores ecológicos e pequenas manchas florestais na mitigação dos efeitos do desmatamento. Portanto, estratégias de conservação devem focar na redução do desmatamento, na proteção de pequenos fragmentos florestais, na implementação de práticas de manejo sustentável e na restauração de áreas degradadas. Essas medidas são essenciais para a preservação das comunidades de besouros rola-bostas e para a saúde dos ecossistemas florestais da Mata Atlântica.

REFERÊNCIAS

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., and Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711–728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Araújo, M. da S., Rodrigues, C. A., Oliveira, M. A. de, and Jesus, F. G. de (2015). CONTROLE BIOLÓGICO DE FORMIGAS-CORTADEIRAS: O CASO DA PREDAÇÃO DE FÊMEAS DE *Atta* spp. POR *Canthon virens*. *REVISTA DE AGRICULTURA NEOTROPICAL* 2, 8–12. doi: 10.32404/rean.v2i3.273
- Aziz, H. A., and Rasidi, M. H. (2014). The role of green corridors for wildlife conservation in urban landscape: A literature review. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 18, 012093. doi: 10.1088/1755-1315/18/1/012093
- Baselga, A., & Orme, C. D. L. (2012). betapart: an R package for the study of beta diversity. *Methods in ecology and evolution*, 3(5), 808-812.
- Benzeev, R., Wiens, A., Piotto, D., and Newton, P. (2023). Property size and forest cover were key determinants of forest restoration in Southern Bahia in the Atlantic Forest of Brazil. *Land use policy* 134, 106879. doi: 10.1016/j.landusepol.2023.106879

- Bogoni, J. A., da Silva, P. G., and Peres, C. A. (2019). Co-declining mammal–dung beetle faunas throughout the Atlantic Forest biome of South America. *Ecography* 42, 1803–1818. doi: 10.1111/ecog.04670
- Bogoni, J. A., Peres, C. A., Navarro, A. B., Carvalho-Rocha, V., and Galetti, M. (2024). Using historical habitat loss to predict contemporary mammal extirpations in Neotropical forests. *Conservation Biology*. doi: 10.1111/cobi.14245
- Braga, R. F., Korasaki, V., Andresen, E., and Louzada, J. (2013). Dung Beetle Community and Functions along a Habitat-Disturbance Gradient in the Amazon: A Rapid Assessment of Ecological Functions Associated to Biodiversity. *PLoS One* 8, e57786. doi: 10.1371/journal.pone.0057786
- Brockerhoff, E. G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D. I., Gardiner, B., González-Olabarria, J. R., et al. (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodivers Conserv* 26, 3005–3035. doi: 10.1007/s10531-017-1453-2
- Carvalho, R. L., Frazão, F., Ferreira–Châline, R. S., Louzada, J., Cordeiro, L., and França, F. (2018). Dung burial by roller dung beetles (Coleoptera: Scarabaeinae): An individual and specific-level study. *Int J Trop Insect Sci* 38, 373–380. doi: 10.1017/S1742758418000206
- Cassano, C. R., Barlow, J., and Pardini, R. (2014). Forest loss or management intensification? Identifying causes of mammal decline in cacao agroforests. *Biol Conserv* 169, 14–22. doi: 10.1016/j.biocon.2013.10.006
- Cassano, C. R., Schroth, G., Faria, D., Delabie, J. H. C., and Bede, L. (2009). Landscape and farm scale management to enhance biodiversity conservation in the cocoa producing region of southern Bahia, Brazil. *Biodivers Conserv* 18, 577–603. doi: 10.1007/s10531-008-9526-x
- Cassenote, S., Valois, M. C., Maldaner, M. E., and Vaz-de-Mello, F. Z. (2020). Taxonomic revision of *Dichotomius* (*Selenocopris*) *nitus* (Olivier, 1719) and *Dichotomius* (*Selenocopris*) *superbus* (Felsche, 1901). *Rev Bras Entomol* 64. doi: 10.1590/1806-9665-rbent-2020-0007
- Chowdhury, S., Jennions, M. D., Zalucki, M. P., Maron, M., Watson, J. E. M., and Fuller, R. A. (2023). Protected areas and the future of insect conservation. *Trends Ecol Evol* 38, 85–95. doi: 10.1016/j.tree.2022.09.004

- CTFB (2024). Lista de Espécies da Fauna do Brasil. Available at: <http://fauna.jbrj.gov.br/fauna/listaBrasil/PrincipalUC/PrincipalUC.do?lingua=pt> (Accessed May 20, 2024).
- da Silva, P. G., and Cassenote, S. (2019). Environmental drivers of species composition and functional diversity of dung beetles along the Atlantic Forest–Pampa transition zone. *Austral Ecol* 44, 786–799. doi: 10.1111/aec.12749
- Dalapicolla, J., Abreu, E. F., do Prado, J. R., de Almeida Chiquito, E., de Oliveira Roth, P. R., de Góes Brennand, P. G., et al. (2021). Areas of endemism of small mammals are underprotected in the Atlantic Forest. *J Mammal* 102, 1390–1404. doi: 10.1093/jmammal/gyab073
- Davis, A. J., Hanski, I., and Cambefort, Y. (1993). Dung Beetle Ecology. *J Anim Ecol* 62, 396. doi: 10.2307/5374
- de Lima, R. A. F., Souza, V. C., de Siqueira, M. F., and ter Steege, H. (2020). Defining endemism levels for biodiversity conservation: Tree species in the Atlantic Forest hotspot. *Biol Conserv* 252, 108825. doi: 10.1016/j.biocon.2020.108825
- de Souza, J. F., Bueno, M. L., and Salino, A. (2021). Atlantic Forest: centres of diversity and endemism for ferns and lycophytes and conservation status. *Biodivers Conserv* 30, 2207–2222. doi: 10.1007/s10531-021-02194-8
- Dirzo, R., Young, H. S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N. J. B., and Collen, B. (2014). Defaunation in the Anthropocene. *Science* (1979) 345, 401–406. doi: 10.1126/science.1251817
- Eisenhauer, N., Bonn, A., and A. Guerra, C. (2019). Recognizing the quiet extinction of invertebrates. *Nat Commun* 10, 50. doi: 10.1038/s41467-018-07916-1
- Fahrig, L. (2002). Effect of Habitat Fragmentation on the Extinction Threshold: A Synthesis. *Ecological Applications* 12, 346. doi: 10.2307/3060946
- Fahrig, L. (2013). Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. *J Biogeogr* 40, 1649–1663. doi: 10.1111/jbi.12130
- Fahrig, L. (2020). Why do several small patches hold more species than few large patches? *Global Ecology and Biogeography* 29, 615–628. doi: 10.1111/geb.13059

- Faria, D., Morante-Filho, J. C., Baumgarten, J., Bovendorp, R. S., Cazetta, E., Gaiotto, F. A., et al. (2023). The breakdown of ecosystem functionality driven by deforestation in a global biodiversity hotspot. *Biol Conserv* 283, 110126. doi: 10.1016/j.biocon.2023.110126
- Filgueiras, B. K. C., Tabarelli, M., Leal, I. R., Vaz-de-Mello, F. Z., and Iannuzzi, L. (2015). Dung beetle persistence in human-modified landscapes: Combining indicator species with anthropogenic land use and fragmentation-related effects. *Ecol Indic* 55, 65–73. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.02.032
- Flesher, K. M. (2015). The Distribution, Habitat Use, and Conservation Status of Three Atlantic Forest Monkeys (*Sapajus xanthosternos*, *Callicebus melanochir*, *Callithrix* sp.) in an Agroforestry/Forest Mosaic in Southern Bahia, Brazil. *Int J Primatol* 36, 1172–1197. doi: 10.1007/s10764-015-9884-7
- Flesher, K. M., and Laufer, J. (2013). Protecting Wildlife in a Heavily Hunted Biodiversity Hotspot: A Case Study from the Atlantic Forest of Bahia, Brazil. *Trop Conserv Sci* 6, 181–200. doi: 10.1177/194008291300600202
- França, F. M., Ferreira, J., Vaz-de-Mello, F. Z., Maia, L. F., Berenguer, E., Ferraz Palmeira, A., et al. (2020). El Niño impacts on human-modified tropical forests: Consequences for dung beetle diversity and associated ecological processes. *Biotropica* 52, 252–262. doi: 10.1111/btp.12756
- Gardner, T. A., Barlow, J., Chazdon, R., Ewers, R. M., Harvey, C. A., Peres, C. A., et al. (2009). Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. *Ecol Lett* 12, 561–582. doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01294.x
- Gómez-Cifuentes, A., Vespa, N., Semmartín, M., and Zurita, G. (2020). Canopy cover is a key factor to preserve the ecological functions of dung beetles in the southern Atlantic Forest. *Applied Soil Ecology* 154, 103652. doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103652
- Halffter, G., and Edmonds, W. D. (1983). The nesting behavior of dung beetles (Scarabaeinae). An ecological and evolutive approach. *New York Entomological Society* 91, 512–515.
- Harvey, J. A., Tougeron, K., Gols, R., Heinen, R., Abarca, M., Abram, P. K., et al. (2023). Scientists' warning on climate change and insects. *Ecol Monogr* 93. doi: 10.1002/ecm.1553
- Holter, P. (2004). Dung feeding in hydrophilid, geotrupid and scarabaeid beetles: Examples of parallel evolution. *Eur J Entomol* 101, 365–372. doi: 10.14411/eje.2004.051

- Holter, P., and Scholtz, C. H. (2007). What do dung beetles eat? *Ecol Entomol* 32, 690–697. doi: 10.1111/j.1365-2311.2007.00915.x
- Huijbregts, J., and Krikken, J. (2012). Taxonomy of Moluccan *Onthophagus*, including eight new species (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae). *Tijdschr Entomol* 155, 29–55. doi: 10.1163/221194312X651337
- Joly, C. A., Metzger, J. P., and Tabarelli, M. (2014). Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. *New Phytologist* 204, 459–473. doi: 10.1111/nph.12989
- Keller, N., van Meerveld, I., Ghazoul, J., Chiew, L. Y., Philipson, C. D., Godoong, E., et al. (2022). Dung beetles as hydrological engineers: effects of tunnelling on soil infiltration. *Ecol Entomol* 47, 84–94. doi: 10.1111/een.13094
- Kobayashi, K., and Ratcliffe, B. C. (2023). A New Species of *Spodochlamys* Burmeister, 1855 (Coleoptera: Scarabaeidae: Rutelinae: *Anatistini*) from Colombia and a Key and Checklist of *Spodochlamys* Species. *Coleopt Bull* 77. doi: 10.1649/0010-065X-77.1.120
- Korasaki, V., Braga, R. F., Zanetti, R., Moreira, F. M. S., Vaz-de-Mello, F. Z., and Louzada, J. (2013). Conservation value of alternative land-use systems for dung beetles in Amazon: valuing traditional farming practices. *Biodivers Conserv* 22, 1485–1499. doi: 10.1007/s10531-013-0487-3
- Larsen, T. H., Lopera, A., Forsyth, A., and Génier, F. (2009). From coprophagy to predation: a dung beetle that kills millipedes. *Biol Lett* 5, 152–155. doi: 10.1098/rsbl.2008.0654
- Magioli, M., Ferraz, K. M. P. M. de B., Chiarello, A. G., Galetti, M., Setz, E. Z. F., Paglia, A. P., et al. (2021a). Land-use changes lead to functional loss of terrestrial mammals in a Neotropical rainforest. *Perspect Ecol Conserv* 19, 161–170. doi: 10.1016/j.pecon.2021.02.006
- Magioli, M., Rios, E., Benchimol, M., Casanova, D. C., Ferreira, A. S., Rocha, J., et al. (2021b). The role of protected and unprotected forest remnants for mammal conservation in a megadiverse Neotropical hotspot. *Biol Conserv* 259, 109173. doi: 10.1016/j.biocon.2021.109173
- Maldaner, M. E., Costa-Silva, V. da, and Vaz-de-Mello, F. Z. (2024). Dung beetles in South American pasturelands. *Biota Neotrop* 24. doi: 10.1590/1676-0611-bn-2023-1567

- Maldaner, M. E., Valois, M. C., and Vaz-de-Mello, F. Z. (2018). A revision of *Dichotomius* (Homocanthonides) Luederwaldt, 1929 (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae). *Rev Bras Entomol* 62, 237–242. doi: 10.1016/j.rbe.2018.05.001
- Maldonado, M. B., Aranibar, J. N., Serrano, A. M., Chacoff, N. P., and Vázquez, D. P. (2019). Dung beetles and nutrient cycling in a dryland environment. *Catena (Amst)* 179, 66–73. doi: 10.1016/j.catena.2019.03.035
- Malhi, Y., Gardner, T. A., Goldsmith, G. R., Silman, M. R., and Zelazowski, P. (2014). Tropical Forests in the Anthropocene. *Annu Rev Environ Resour* 39, 125–159. doi: 10.1146/annurev-environ-030713-155141
- Manning, P., Slade, E. M., Beynon, S. A., and Lewis, O. T. (2016). Functionally rich dung beetle assemblages are required to provide multiple ecosystem services. *Agric Ecosyst Environ* 218, 87–94. doi: 10.1016/j.agee.2015.11.007
- Marques, M. C. M., and Grelle, C. E. V. (2021). *The Atlantic Forest: History, Biodiversity, Threats and Opportunities of the Mega-diverse Forest.*, eds. M. C. M. Marques and C. E. V. Grelle. Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-55322-7
- Marsh, C. J., Louzada, J., Beiroz, W., and Ewers, R. M. (2013). Optimising Bait for Pitfall Trapping of Amazonian Dung Beetles (Coleoptera: Scarabaeinae). *PLoS One* 8, e73147. doi: 10.1371/journal.pone.0073147
- Morante-Filho, J. C., Benchimol, M., and Faria, D. (2021). Landscape composition is the strongest determinant of bird occupancy patterns in tropical forest patches. *Landsc Ecol* 36, 105–117. doi: 10.1007/s10980-020-01121-6
- Mota, A. A., Carvalho, E., Correa, C. M. A., and Vaz-de-Mello, F. Z. (2023). Identification guide of dung beetle species (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae) of the Brazilian Pantanal. *Biota Neotrop* 23. doi: 10.1590/1676-0611-bn-2022-1443
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., and Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. doi: 10.1038/35002501
- Nichols, E., Gardner, T. A., Peres, C. A., and Spector, S. (2009). Co-declining mammals and dung beetles: an impending ecological cascade. *Oikos* 118, 481–487. doi: 10.1111/j.1600-0706.2008.17268.x

- Nichols, E., Larsen, T., Spector, S., Davis, A. L., Escobar, F., Favila, M., et al. (2007). Global dung beetle response to tropical forest modification and fragmentation: A quantitative literature review and meta-analysis. *Biol Conserv* 137, 1–19. doi: 10.1016/j.biocon.2007.01.023
- Nichols, E. S., and Gardner, T. A. (2011). “Dung Beetles as a Candidate Study Taxon in Applied Biodiversity Conservation Research,” in *Ecology and Evolution of Dung Beetles*, (Wiley), 267–291. doi: 10.1002/9781444342000.ch13
- Nichols, E., Spector, S., Louzada, J., Larsen, T., Amezquita, S., and Favila, M. E. (2008). Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. *Biol Conserv* 141, 1461–1474. doi: 10.1016/j.biocon.2008.04.011
- Nunes, C. A., Braga, R. F., de Moura Resende, F., de Siqueira Neves, F., Figueira, J. E. C., and Fernandes, G. W. (2018). Linking Biodiversity, the Environment and Ecosystem Functioning: Ecological Functions of Dung Beetles Along a Tropical Elevational Gradient. *Ecosystems* 21, 1244–1254. doi: 10.1007/s10021-017-0216-y
- Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., et al. (2024). vegan: Community Ecology Package. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/index.html>
- Outhwaite, C. L., McCann, P., and Newbold, T. (2022). Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide. *Nature* 605, 97–102. doi: 10.1038/s41586-022-04644-x
- Pardini, R., Faria, D., Accacio, G. M., Laps, R. R., Mariano-Neto, E., Paciencia, M. L. B., et al. (2009). The challenge of maintaining Atlantic forest biodiversity: A multi-taxa conservation assessment of specialist and generalist species in an agro-forestry mosaic in southern Bahia. *Biol Conserv* 142, 1178–1190. doi: 10.1016/j.biocon.2009.02.010
- Piccini, I., Arnieri, F., Caprio, E., Nervo, B., Pelissetti, S., Palestini, C., et al. (2017). Greenhouse gas emissions from dung pats vary with dung beetle species and with assemblage composition. *PLoS One* 12, e0178077. doi: 10.1371/journal.pone.0178077
- Pinto Leite, C. M., Mariano-Neto, E., and Rocha, P. L. B. da (2018). Biodiversity thresholds in invertebrate communities: The responses of dung beetle subgroups to forest loss. *PLoS One* 13, e0201368. doi: 10.1371/journal.pone.0201368

- Raine, E. H., and Slade, E. M. (2019). Dung beetle–mammal associations: methods, research trends and future directions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 286, 20182002. doi: 10.1098/rspb.2018.2002
- Régnier, C., Achaz, G., Lambert, A., Cowie, R. H., Bouchet, P., and Fontaine, B. (2015). Mass extinction in poorly known taxa. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 7761–7766. doi: 10.1073/pnas.1502350112
- Reis, C., Zarucki, M., Delabie, J., and Escobar, F. (2023). Biodiversity impacts of land use simplification: a case study of dung beetles in a landscape of the Brazilian Atlantic Forest. *Int J Trop Insect Sci* 43, 2045–2056. doi: 10.1007/s42690-023-01106-3
- Resende, A. F., Gavioli, F. R., Chaves, R. B., Metzger, J. P., Guedes Pinto, L. F., Piffer, P. R., et al. (2024). How to enhance Atlantic Forest protection? Dealing with the shortcomings of successional stages classification. *Perspect Ecol Conserv.* doi: 10.1016/j.pecon.2024.04.002
- Rezende, C. L., Scarano, F. R., Assad, E. D., Joly, C. A., Metzger, J. P., Strassburg, B. B. N., et al. (2018). From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspect Ecol Conserv* 16, 208–214. doi: 10.1016/j.pecon.2018.10.002
- Ribeiro, M. C., Metzger, J. P., Martensen, A. C., Ponzoni, F. J., and Hirota, M. M. (2009). The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biol Conserv* 142, 1141–1153. doi: 10.1016/j.biocon.2009.02.021
- Rocha-Santos, L., Pessoa, M. S., Cassano, C. R., Talora, D. C., Orihuela, R. L. L., Mariano-Neto, E., et al. (2016). The shrinkage of a forest: Landscape-scale deforestation leading to overall changes in local forest structure. *Biol Conserv* 196, 1–9. doi: 10.1016/j.biocon.2016.01.028
- Salomão, R. P., Vaz-de-Mello, F., Cupello, M. J., and Cassiano, L. de A. (2024). Dung beetle (Coleoptera: Scarabaeinae) attraction to woodcreeper (Aves: Dendrocolaptidae) dropping in the central Amazon. *Acta Amazon* 54. doi: 10.1590/1809-4392202301510
- Samways, M. J., Barton, P. S., Birkhofer, K., Chichorro, F., Deacon, C., Fartmann, T., et al. (2020). Solutions for humanity on how to conserve insects. *Biol Conserv* 242, 108427. doi: 10.1016/j.biocon.2020.108427

- Sánchez-de-Jesús, H. A., Arroyo-Rodríguez, V., Andresen, E., and Escobar, F. (2016). Forest loss and matrix composition are the major drivers shaping dung beetle assemblages in a fragmented rainforest. *Landsc Ecol* 31, 843–854. doi: 10.1007/s10980-015-0293-2
- Sánchez-Hernández, G., and del Campo, F. G.-M. (2023). Record of the dung beetle *Canthon lucreciae* Halffter & Halffter, 2009 (Coleoptera: Scarabaeinae) feeding on a millipede in a tropical rainforest. *Revista Chilena de Entomología* 49, 643–648. doi: 10.35249/rche.49.3.23.25
- Sandor, M. E., and Chazdon, R. L. (2014). Remnant Trees Affect Species Composition but Not Structure of Tropical Second-Growth Forest. *PLoS One* 9, e83284. doi: 10.1371/journal.pone.0083284
- Schroth, G., Jeusset, A., Gomes, A. da S., Florence, C. T., Coelho, N. A. P., Faria, D., et al. (2016). Climate friendliness of cocoa agroforests is compatible with productivity increase. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang* 21, 67–80. doi: 10.1007/s11027-014-9570-7
- Scudder, G. G. E. (2017). “The Importance of Insects,” in *Insect Biodiversity*, (Wiley), 9–43. doi: 10.1002/9781118945568.ch2
- Silva, J. L. da, and Vaz-de-Mello, F. Z. (2020). Areas of endemism in the Brazilian Atlantic Forest based on the distribution of dung beetles (Coleoptera, Scarabaeidae, Scarabaeinae). *Iheringia Ser Zool* 110. doi: 10.1590/1678-4766e2020003
- Silveira, F. A. O., Santos, J. C., Viana, L. R., and Falqueto, S. A. (2006). Predation on *Atta laevigata* (Smith 1858) (Formicidae Attini) by *Canthon virens* (Mannerheim 1829) (Coleoptera Scarabaeidae). *Tropical Zoology* 19, 1–7. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/252320824>
- Slade, E. M., Mann, D. J., and Lewis, O. T. (2011). Biodiversity and ecosystem function of tropical forest dung beetles under contrasting logging regimes. *Biol Conserv* 144, 166–174. doi: 10.1016/j.biocon.2010.08.011
- Slade, E. M., Mann, D. J., Villanueva, J. F., and Lewis, O. T. (2007). Experimental evidence for the effects of dung beetle functional group richness and composition on ecosystem function in a tropical forest. *Journal of Animal Ecology* 76, 1094–1104. doi: 10.1111/j.1365-2656.2007.01296.x

- Slade, E. M., Roslin, T., Santalahti, M., and Bell, T. (2016). Disentangling the ‘brown world’ faecal–detritus interaction web: dung beetle effects on soil microbial properties. *Oikos* 125, 629–635. doi: 10.1111/oik.02640
- Souza, T. B., França, F. M., Barlow, J., Dodonov, P., Santos, J. S., Faria, D., et al. (2020). The relative influence of different landscape attributes on dung beetle communities in the Brazilian Atlantic Forest. *Ecol Indic* 117, 106534. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106534
- Strassburg, B. B. N., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C., et al. (2020). Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature* 586, 724–729. doi: 10.1038/s41586-020-2784-9
- Teles, C. B., Magnago, L. F. S., Carilo Filho, L. M., and Piotto, D. (2022). Relationship between the richness of tree species and edaphoclimatic characteristics of the south region of Bahia, Brazil. *Austral Ecol* 47, 1448–1455. doi: 10.1111/aec.13226
- Tichý, L. (2016). Field test of canopy cover estimation by hemispherical photographs taken with a smartphone. *Journal of Vegetation Science* 27, 427–435. doi: 10.1111/jvs.12350
- Tissiani, A. S. de O., Vaz-de-Mello, F. Z., and Campelo-Júnior, J. H. (2017). Dung beetles of Brazilian pastures and key to genera identification (Coleoptera: Scarabaeidae). *Pesqui Agropecu Bras* 52, 401–418. doi: 10.1590/s0100-204x2017000600004
- Tixier, T., Bloor, J. M. G., and Lumaret, J.-P. (2015). Species-specific effects of dung beetle abundance on dung removal and leaf litter decomposition. *Acta Oecologica* 69, 31–34. doi: 10.1016/j.actao.2015.08.003
- Turvey, S. T., and Crees, J. J. (2019). Extinction in the Anthropocene. *Current Biology* 29, R982–R986. doi: 10.1016/j.cub.2019.07.040
- Vancine, M. H., Muylaert, R. L., Niebuhr, B. B., Oshima, J. E. de F., Tonetti, V., Bernardo, R., et al. (2024). The Atlantic Forest of South America: Spatiotemporal dynamics of the vegetation and implications for conservation. *Biol Conserv* 291, 110499. doi: 10.1016/j.biocon.2024.110499
- Vaz-de-Mello, F. Z., Bavutti, L. L. O., Flechtmann, C. A. H., Puker, A., and Correa, C. M. A. (2017). Lista de espécies dos Scarabaeinae (Coleoptera, Scarabaeidae) do Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. *Iheringia Ser Zool* 107. doi: 10.1590/1678-4766e2017120

- Vaz-de-Mello, F. Z., EDMONDS, W. D., OCAMPO, F. C., and SCHOOLMEESTERS, P. (2011). A multilingual key to the genera and subgenera of the subfamily Scarabaeinae of the New World (Coleoptera: Scarabaeidae). *Zootaxa* 2854. doi: 10.11646/zootaxa.2854.1.1
- Wagner, D. L., Grames, E. M., Forister, M. L., Berenbaum, M. R., and Stopak, D. (2021). Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118. doi: 10.1073/pnas.2023989118
- Yamada, D., Imura, O., Shi, K., and Shibuya, T. (2007). Effect of tunneler dung beetles on cattle dung decomposition, soil nutrients and herbage growth. *Grassl Sci* 53, 121–129. doi: 10.1111/j.1744-697X.2007.00082.x

CAPÍTULO 3

DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL E RIQUEZA DE BESOUROS ROLA-BOSTA EM DIFERENTES CENÁRIOS CLIMÁTICOS NO SUL BAIANO

INTRODUÇÃO

A investigação do impacto das mudanças climáticas sobre a distribuição das espécies é fundamental para os esforços de conservação (Bellard et al., 2012; Souza et al., 2019). À medida que os padrões de precipitação e temperatura se alteram, regiões podem deixar de apresentar clima adequado para as espécies, promovendo modificações em suas distribuições (Thomas et al., 2004; Parmesan, 2006). Os efeitos variam desde impactos sutis em espécies individuais dentro de ecossistemas multitróficos complexos até efeitos mais abruptos de degradação do ecossistema (Nichols et al., 2009; Bogoni et al., 2019; Cardoso et al., 2020).

A Mata Atlântica é um bioma megadiverso, e um dos mais ameaçados globalmente (Rezende et al., 2018), estando entre os cinco principais hotspots de biodiversidade (Myers et al., 2000), abrigando 50,5% das espécies ameaçadas de extinção no Brasil, 38,5% das quais são endêmicas desse domínio florestal (ICMBio, 2018). No entanto, o bioma ainda sofre com desmatamento, restando apenas 23% de cobertura florestal, sendo a maioria em fragmentos menores que 50 hectares (97%) (Vancine et al., 2024). Dessa forma, há estimativas de que a diversidade de mamíferos deve reduzir em até 18% nas próximas décadas, principalmente nas porções norte e central da Mata Atlântica (Bogoni et al., 2020). Além dos impactos diretos no número de espécies de mamíferos, efeitos indiretos sobre outros organismos associados também podem ocorrer (Dirzo et al., 2014; Galetti et al., 2017; Bogoni et al., 2019).

Os besouros da subfamília Scarabaeinae são popularmente conhecidos como besouros rola-bostas por utilizarem esterco para fins de alimentação e nidificação (Davis et al., 1993). Ao manipular recursos, esses besouros accidentalmente desempenham um papel vital no processamento da matéria orgânica (França et al., 2018), entregando diversos serviços ecossistêmicos como dispersão secundária de sementes, descompactação e aeração do solo, transporte de nutrientes e microrganismos, regulação de parasitas e redução da volatilização de metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) ambos gases de efeito estufa (GEE) (Yamada et al., 2007; Nichols et al., 2008; Slade et al., 2016b, 2016a; deCastro-Arrazola et al., 2023). No entanto, investigações anteriores destacaram o declínio alarmante das populações de insetos, incluindo os besouros rola-bostas, na era do Antropoceno (Thomas et al., 2004; Wagner et al., 2021). Além disso, o trabalho de Vickers and Buckland (2015) sobre a previsão de faunas de besouros rola-bostas insulares com base em intervalos climáticos, esclarece a relação complexa entre o clima e a diversidade desse grupo.

Apesar da importância ecológica dos besouros rola-bostas, perturbações antropogênicas colocam em risco a persistência e eficácia destes organismos no ecossistema (Larsen, 2012; Pinto Leite et al., 2018; Souza et al., 2020; Wagner et al., 2021). As mudanças previstas nos padrões de temperatura e precipitação representam riscos significativos para suas populações (Holley and Andrew, 2020; Gotcha et al., 2022). Estudos recentes destacam a vulnerabilidade dos besouros rola-bostas às alterações climáticas dado que a tolerância térmica é variável entre as espécies do grupo (Nyamukondiwa et al., 2018; Kirkpatrick and Sheldon, 2022), e que a espécie e abundância de besouros varia espaço-temporalmemente (Hernández and Vaz-de-Mello, 2009; da Silva and Cassenote, 2019; Salomão et al., 2020). Kirkpatrick and Sheldon (2022) observaram que fêmea de besouros de *Phanaeus vindex* (MacLeay, 1819) alteram seu comportamento de reprodução em resposta as mudanças climáticas, diminuindo o tamanho da bola de cria e aumentando a profundidade em que as enterram. Holley and Andrew (2020) observaram uma redução do tamanho no número de crias em besouros *Onthophagus taurus* (Schreber, 1759) quando expostos a altas temperaturas.

Para conservar a diversidade dos besouros rola-bostas, além de sua distribuição atual, é também essencial investigar os impactos das mudanças climáticas nas populações e comunidades desses besouros no futuro (Nervo et al., 2021; Gotcha et al., 2022; Alcântara et al., 2023), especialmente em ambientes degradados, como é o caso da Mata Atlântica. Neste contexto, utilizamos modelos de nicho ecológico para projetar a distribuição potencial de espécies de besouros rola-bostas coletadas no sul da Bahia em diferentes cenários climáticos futuros. Esperamos um declínio na riqueza de espécies como consequência da redução do tamanho de área adequada quando comparadas as distribuições atuais à medida que a região se torna mais quente e seca. Os resultados obtidos contribuirão para o planejamento da conservação dos besouros rola-bostas na região, através da identificação de áreas mais e menos diversas, a fim de evitar a perda de espécies e dos serviços que elas prestam.

OBJETIVO

Modelar a distribuição potencial das espécies de *Scarabaeinae* amostradas no capítulo 2 do presente estudo, sob diferentes cenários climáticos (SSP1-2.6 e SSP5-8.5) para 2050 e 2070, avaliando mudanças na adequabilidade ambiental e possíveis impactos para a conservação.

METODOLOGIA

Área de estudo

Ao longo do bioma Mata Atlântica, a porção localizada ao Sul da Bahia combina maiores potenciais de armazenamento de carbono com menores níveis de perturbação (Rezende et al., 2018). São áreas com maior resiliência da paisagem e, portanto, áreas de interesse para uma restauração proporcionalmente mais eficiente (Rezende et al., 2018; de Lima et al., 2020a). A região também é descrita como área de endemismo para diversos grupos biológicos como plantas, anfíbios, répteis, primatas (Thomas et al., 1998; Ostroski et al., 2020; Rojas-Padilla et al., 2020; Ferreira et al., 2024), além de ser considerada centro de endemismo para besouros rola-bostas (Coleoptera, Scarabaeidae, Scarabaeinae) (Silva and Vaz-de-Mello, 2020).

O clima atual da região é classificado como *Af*, quente e úmido, segundo a classificação de Köppen (Fig. 1) (Alvares et al., 2013), com temperatura média de 24°C e precipitação média anual de 1.500 mm. A região não tem sazonalidade definida, embora a estação de seca apresente um período mais quente e sem chuvas entre os meses de dezembro a março. Devido à pressão antrópica sobre a região, as mudanças no uso da terra durante as últimas décadas transformaram a floresta nativa em um mosaico florestal de diferentes tipos de vegetação (e.g. fragmentos de florestas maduras e secundárias, Cabrucas, seringueiras e *Eucalyptus* sp) e pastagens (Cassano et al., 2009; Pardini et al., 2009).

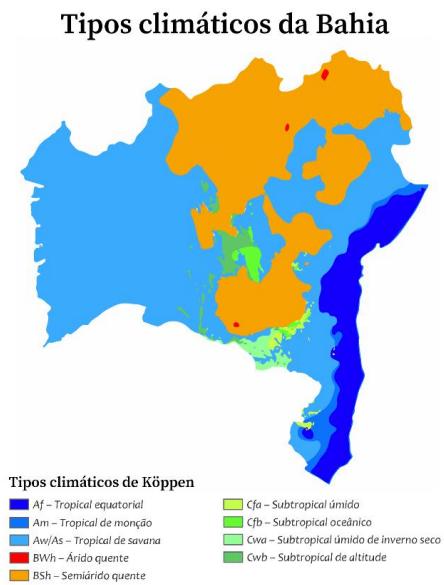


Figura 1. Mapa da classificação climática para o estado da Bahia.

Dados de ocorrências de besouros rola-bostas

A lista de espécies utilizadas foi definida a parti das 55 espécies de besouros rola-bostas amostradas em quatro municípios no sul da Bahia no capítulo 2 deste estudo, (consulte material suplementar). Em seguida, buscamos os dados de ocorrência nas plataformas abertas como GBIF (www.gbif.org), iNaturalist (www.inaturalist.org) e iDigBio (www.idigbio.org). Considerando que o presente trabalho não dispôs de recursos financeiros, as plataformas de ocorrências abertas proporcionam a possibilidade de obtenção de dados de ocorrência para a construção dos modelos.

Além disso, o uso dessas bases de dados amplia a abrangência espacial e temporal das análises, permitindo a incorporação de registros históricos e de áreas não amostradas diretamente em campo. Além disso, facilita a modelagem da distribuição potencial das espécies, fornecendo subsídios para avaliar impactos ambientais e projeções climáticas futuras. O controle de qualidade dos pontos foi realizado com auxílio do pacote “CoordinateCleaner” (Zizka et al., 2019) para eliminar duplicatas e inconsistências, como centroides de municípios.

Dados climáticos

Obtivemos 19 variáveis bioclimáticas da plataforma WorldClim v2.1 (Fick and Hijmans, 2017) (Tab. 1) com resolução espacial de 30 segundos arco para os cenários do presente e do futuro (2050 e 2070). Essas variáveis são derivadas de medições de precipitação e temperatura e são comumente usadas na literatura (Prieto-Torres et al., 2020; Oliveira-Silva et al., 2022). Usamos o pacote R “ENMwizard” (Heming et al., 2019) para selecionar as variáveis menos correlacionadas abaixo do valor de corte de 0,7 para cada espécie, a fim de evitar colinearidade (Dormann et al., 2013). Para os cenários climáticos futuros, consideramos quatro Modelos Climáticos Globais (GCMs): IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR e UKESM1-0-LL, e dois Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs): 245 e 585. Os GCMs foram escolhidos com base na melhoria de performance da última versão do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6) em relação à anterior (Cannon, 2020), enquanto que os SSPs representam cenários otimista (SSP245) e pessimista (SSP585) de concentração de gases de efeito estufa (O’Neill et al., 2014).

Tabela 1. Variáveis bioclimáticas para os cenários climáticos presente e futuros disponíveis na plataforma WorldClim (www.worldclim.org).

Abreviação	Descrição
BIO1	Temperatura Média Anual
BIO2	Variação Diurna Média (Média mensal (temp. máx. - temp. mín.))
BIO3	Isotermalidade (BIO2/BIO7) ($\times 100$)
BIO4	Sazonalidade da Temperatura (desvio padrão $\times 100$)
BIO5	Temperatura Máxima do Mês Mais Quente
BIO6	Temperatura Mínima do Mês Mais Frio
BIO7	Amplitude Térmica Anual (BIO5-BIO6)
BIO8	Temperatura Média do Trimestre Mais Úmido
BIO9	Temperatura Média do Trimestre Mais Seco
BIO10	Temperatura Média do Trimestre Mais Quente
BIO11	Temperatura Média do Trimestre Mais Frio
BIO12	Precipitação Annual
BIO13	Precipitação do Mês Mais Úmido
BIO14	Precipitação do Mês Mais Seco
BIO15	Sazonalidade da Precipitação (Coeficiente de Variação)
BIO16	Precipitação do Trimestre Mais Úmido
BIO17	Precipitação do Trimestre Mais Seco
BIO18	Precipitação do Trimestre Mais Quente
BIO19	Precipitação do Trimestre Mais Frio

Modelos de nicho ecológico

Utilizamos o algoritmo MaxEnt (Phillips et al., 2006) para modelar o nicho das espécies de rola-bosta coletadas e identificadas no sul e extremo sul da Bahia. Esse algoritmo apresenta desempenho comparável a outros alternativos e requer apenas dados de ocorrência (Elith et al., 2006; Kaky et al., 2020). Definimos a área de calibração para cada espécie criando um polígono convexo mínimo em torno de todas as ocorrências, mais um buffer de 1,5° (~165 km²) através do pacote “ENMwizard” para melhorar o poder preditivo do MaxEnt, dado que o buffer representa áreas potencialmente acessíveis para as espécies e aumenta a heterogeneidade das variáveis, permitindo estimativas de nicho mais realistas (Anderson and Raza, 2010; Barve et al., 2011). Em seguida, filtramos os registros de cada espécie para obter o máximo número de ocorrências com pelo menos 1 km de distância entre si (baseado na capacidade de dispersão do grupo), através do pacote “spThin” (Aiello-Lammens et al., 2015). Este procedimento reduz o viés de amostragem e melhora o desempenho do modelo (Boria et al., 2014). Modelamos todas as espécies de rola-bosta com pelo menos 9 registros após o filtro anterior para garantir boas previsões (Wisz et al., 2008) (n = 15; Tab. 2). Otimizamos os parâmetros do MaxEnt usando o pacote “ENMeval” (Muscarella

et al., 2014) para incorporar todas as combinações de 10 multiplicadores de regularização (de 0,5 a 5,0 com intervalos de 0,5) e sete combinações de três classes de características (L: linear, Q: quadrática, P: produto), resultando em 70 modelos por espécie. Para a validação cruzada dos modelos, utilizamos o método de partição “block”, que melhora a transferibilidade espacial e temporal (Roberts et al., 2017), e o método “jackknife” para espécies com menos de 15 registros (Shcheglovitova and Anderson, 2013). Construímos um modelo consensual para cada espécie a partir dos 10% dos modelos MaxEnt de melhor desempenho, escolhidos com base na menor Taxa de Omissão (OR) e na maior Área Abaixo da Curva (AUC) (Boria et al., 2017). Posteriormente, calculamos uma média ponderada para combinar os resultados dos quatro GCMs e convertemos os modelos finais em mapas binários de área “adequada” e “inadequada” usando o limiar de “ten percentile training presence” calculado pelo MaxEnt, onde 10% das áreas menos adequadas são desconsideradas.

Análise de dados

Calculamos a riqueza de espécies por cenário, a área total por espécie por cenário e a porcentagem de mudança entre os cenários presente e futuros por espécie utilizando o pacote “divraster” (Mota et al., 2023b). Todas as análises foram realizadas no R v4.2.3 (R Core Team, 2023) e os mapas provenientes das análises foram gerados no QGIS v3.28.11 (QGIS, 2023).

RESULTADOS

Os modelos apresentaram bom ajuste para 15 espécies de rola-bosta, com a Área Abaixo da Curva (AUC) variando de 0,7678 a 0,9878 (média = 0,8424) e a Taxa de Omissão (OR) variando de 0,0595 a 0,3482 (média = 0,1675). Apenas a espécie *Phanaeus palaeno* apresentou baixo ajuste, com 0,4273 de AUC e 0,4286 de OR. A maioria das espécies de besouros rola-bostas (66%) deve perder área climaticamente adequada em pelo menos um dos cenários futuros avaliados. As maiores reduções na área adequada são esperadas para as espécies do gênero *Dichotomius*, principalmente no cenário pessimista de 2070, onde as perdas são mais acentuadas. Nossas projeções indicam uma diminuição de área adequada variando de 48% a 63% para a espécie *Dichotomius gilletti*, enquanto que para a espécie *Dichotomius sericeus*, a perda potencial de área adequada pode chegar a 36%. Contrações menores são esperadas para as espécies *Phanaeus splendidulus* (3-11%) e *Streblopus opatroides* (5-8%) (Tab. 2). A espécie *Canthon* (*Peltocanthon*)

staigi foi a única que apresentou potencial ganho de área climaticamente adequada, com 4% de aumento em todos os cenários avaliados. Além disso, as espécies *Dichotomius irinus* e *Eurysternus nigrovirens* não apresentaram mudanças na área adequada entre os cenários presente e futuros (Tab. 2).

Tabela 2. Tamanho da área climaticamente adequada (km^2) para as espécies de besouros rola-bostas do sul da Bahia em diferentes cenários climáticos.

Espécie	2050 otimista	2070 otimista	2050 pessimista	2070 pessimista
<i>Canthon (Peltocanthon) haroldi</i> (Harold, 1867)	-18%	-22%	-33%	-35%
<i>Canthon (Peltocanthon) staigi</i> (Pereira, 1953)	4%	4%	4%	4%
<i>Coprophanaeus dardanus</i> (MacLeay, 1819)	-3%	-5%	-4%	-7%
<i>Dichotomius gilletti</i> (Valois, Vaz-de-Mello & Silva, 2017)	-54%	-55%	-53%	-48%
<i>Dichotomius iannuzziae</i> (Valois, Vaz-de-Mello & Silva, 2017)	-20%	-24%	-13%	-6%
<i>Dichotomius irinus</i> (Harold, 1867)	0%	0%	0%	0%
<i>Dichotomius laevicollis</i> (Felsche, 1901)	-15%	-17%	-24%	-41%
<i>Dichotomius mormon</i> (Ljungh, 1799)	-4%	-6%	-4%	-6%
<i>Dichotomius nisus</i> (Olivier, 1789)	-56%	-59%	-60%	-63%
<i>Dichotomius sericeus</i> (Harold, 1867)	-7%	-12%	-18%	-36%
<i>Eurysternus caribaeus</i> (Herbst, 1789)	-5%	-8%	-10%	-20%
<i>Eurysternus nigrovirens</i> (Génier, 2009)	0%	0%	0%	0%
<i>Eurysternus parallelus</i> (Castelnau, 1840)	-16%	-17%	-16%	-28%
<i>Phanaeus palaeno</i> (Blanchard, 1845)	1%	-1%	-3%	-9%
<i>Phanaeus splendidulus</i> (Fabricius, 1781)	-3%	-5%	-6%	-11%
<i>Streblopus opatroides</i> (Van Lansberge, 1874)	-5%	-6%	-5%	-8%

Os resultados indicam uma maior riqueza de besouros rola-bostas na porção nordeste do sul da Bahia e menor na porção sudoeste para o cenário presente (Fig. 2). Além disso, as projeções para todos os cenários climáticos futuros indicam uma diminuição da riqueza, principalmente no cenário pessimista de 2070. Observamos que a porção sudoeste, que apresenta riqueza mediana no presente, deverá perder mais espécies e, portanto, espera-se que a região retenha um menor número de espécies nos cenários futuros. Por outro lado, espera-se que todas as espécies de rola-bosta mantenham área adequada na porção norte, embora essa área seja menor nos cenários futuros em comparação ao presente.

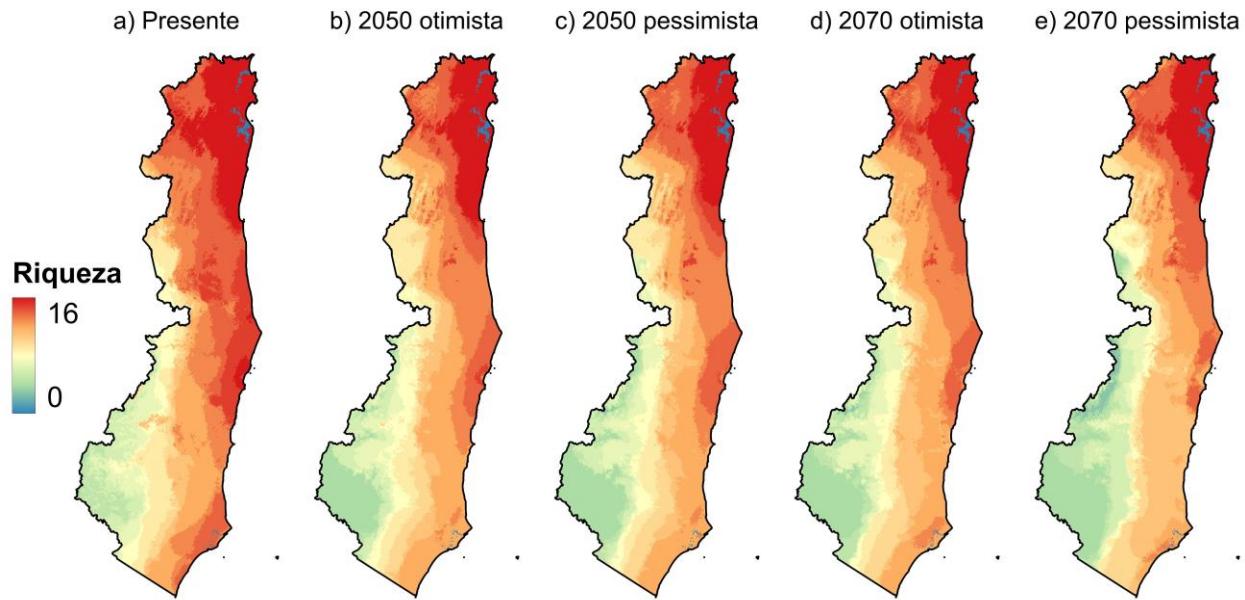


Figura 2. Riqueza de besouros rola-bostas para os cenários climáticos presente (a) e futuro (b-e) no sul da Bahia. Cenário otimista: SSP245. Cenário pessimista: SSP585.

DISCUSSÃO

Nossos resultados demonstram uma gama variada de respostas às mudanças climáticas entre as espécies de besouros rola-bosta. Espécies como *Canthon haroldi* e *Canthon staigi*, devem ampliar suas distribuições, enquanto outras, especialmente várias espécies do gênero *Dichotomius*, devem sofrer grandes perdas de áreas adequada no futuro. A estabilidade observada em espécies como *Canthon staigi* e *Eurysternus nigrovirens* sugere que alguns besouros podem possuir características que lhes permitem resistir melhor às mudanças climáticas. Compreender a bionômica, campo de estudo focado em entender os hábitos, comportamentos, ciclos de vida, nichos ecológicos e adaptações dos organismos em resposta a fatores ambientais de cada espécie, bem como as respostas individuais e das assembleias, é crucial para direcionar esforços de conservação. O que possibilita examinar a necessidade de medidas específicas para as espécies mais vulneráveis, como aquelas de maior porte e geralmente dependentes de florestas.

Nossas projeções indicam que a maioria das espécies de rola-bostas (81,25%) perderá área climaticamente adequada no futuro. A vulnerabilidade desses organismos às mudanças climáticas já fora relatada em estudos recentes (Bogoni et al., 2019; Maldaner et al., 2024) e está em consonância com estudos anteriores que mostraram que as alterações climáticas tendem a reduzir

as áreas habitáveis para muitas espécies, particularmente em ecossistemas tropicais (Bellard et al., 2014; Pérez-Méndez et al., 2016; Trew and Maclean, 2021). As espécies do gênero *Dichotomius* são as que apresentam projeções de menor área adequada futura, e *Dichotomius gilletti* (Valois, Vaz-de-Mello & Silva, 2017) é a espécie mais ameaçada pela perda de área adequada. Desta forma, espécies do gênero *Dichotomius* parecem ser particularmente afetadas, com perdas de área adequada projetadas entre 4% e 63%, o que é preocupante, uma vez que são espécies de maior tamanho corpóreo, e hábito noturno (da Silva and Cassenote, 2019; Alcântara et al., 2023). Além disso, com a diminuição da área adequada para *D. gilletti* no futuro, sua distribuição deixará de coincidir com a ocorrência de 16% das espécies de mamíferos de médio e grande porte da região (Souza et al., 2019). Essa tendência é preocupante, visto que os besouros rola-bostas são altamente dependentes desses mamíferos (Nichols et al., 2009).

A potencial expansão de área adequada para *Canthon haroldi* em cenários futuros sugere que algumas espécies podem se beneficiar das mudanças climáticas, possivelmente devido a uma maior tolerância às condições mais quentes e secas ou a mudanças na competitividade interespecífica (Macagno et al., 2018; Gotcha et al., 2022; Mamantov and Sheldon, 2023). No entanto, a falta de mudança na área adequada para espécies como *Canthon staigi*, *Eurysternus nigrovirens*, *E. parallelus* e *Phanaeus palaeno* sugere que nem todas as espécies responderão de maneira uniforme às mudanças climáticas, refletindo a complexidade das interações ecológicas e das respostas individuais às variações ambientais (Holley and Andrew, 2020; Cuesta et al., 2021; Thotagamuwa et al., 2023). Além disso, a estabilidade observada em espécies como *Canthon staigi* e *Eurysternus nigrovirens* sugere que alguns besouros podem possuir características que lhes permitirão resistir melhor às mudanças climáticas. No entanto, a lacuna sobre como diferentes espécies responderão a tais mudanças permanece (Cuesta et al., 2021). Por exemplo, fêmeas das espécies *Phanaeus vindex* (MacLeay, 1819) e *Onthophagus taurus* (Schreber, 1759) alteram seu comportamento reprodutivo quando expostas à maiores temperaturas em um ambiente simulado (Macagno et al., 2018; Kirkpatrick and Sheldon, 2022). Neste caso, fêmeas de *Phanaeus vindex* produziram mais bolas de cria, porém menores e o enterro das bolas ocorreu em profundidades maiores onde a temperatura é mais amena (Kirkpatrick and Sheldon, 2022). O ganho de área adequada projetado para todos os cenários futuros para as espécies *Canthon haroldi* e *Canthon staigi* sugere que as mudanças climáticas podem favorecer o gênero. O que é corroborado pelo

maior tamanho corpóreo em ambientes mais quentes já observado para a espécie *Canthon rutilans cyanescens* (Harold 1868) (Alcântara et al., 2023).

A diminuição projetada na riqueza de espécies de besouros rola-bostas, especialmente nos cenários pessimistas, é alarmante. A porção nordeste do sul da Bahia, atualmente a mais rica em espécies, está prevista para sofrer reduções significativas, o que pode levar a um declínio nos serviços ecossistêmicos fornecidos por esses besouros, como a dispersão de sementes e a descompactação do solo (Nichols et al., 2008; Nervo et al., 2017; Keller et al., 2022; Anderson et al., 2024). Este declínio na riqueza pode exacerbar os efeitos da degradação do habitat (Simberloff et al., 2013) e da fragmentação da Mata Atlântica, que já se encontra comprometida (Rezende et al., 2018; Faria et al., 2023). Assim a associação entre as mudanças climáticas e outros estressores, em particular a perda de habitat, podem ocasionar uma homogeneização biótica das assembleias de besouros rola-bostas (Bicknell et al., 2014; Bennett et al., 2023; Bernardino et al., 2024). A menor riqueza de espécies de rola-bostas na porção sudoeste da região, mesmo nos cenários futuros, pode indicar uma área prioritária para a regeneração, orientando estratégias de conservação e manejo de habitats para esses besouros, visando mitigar os impactos das mudanças climáticas nas assembleias do sul da Bahia. Espécies com maior tamanho corpóreo, apresentam taxas maiores de remoção de esterco e são mais sensíveis à fragmentação de habitat, devido a demanda de habitats florestais, elas são as mais ameaçadas pelas mudanças climáticas (Pinto Leite et al., 2018; Morgan Fleming et al., 2021; Bernardino et al., 2024). Espécies com menor tamanho corpóreo são comumente mais adaptadas a ambientes de borda e variações de temperatura (Davis et al., 1993; Nervo et al., 2014; Souza et al., 2020; Alcântara et al., 2023). Portanto, é importante considerar não apenas a proteção das áreas atuais de alta diversidade, mas também a criação de corredores ecológicos, bem como a conservação de grandes fragmentos (Filgueiras et al., 2015; Pinto Leite et al., 2018) que permitam a migração e a adaptação das espécies em resposta às mudanças climáticas (Gotcha et al., 2022; Lewinsohn et al., 2022; Duffus et al., 2023; de Oliveira et al., 2024).

As espécies de besouros rola-bostas têm requisitos diferentes de habitat (Bitencourt and da Silva, 2016; Pinto Leite et al., 2018; da Silva and Cassenote, 2019; Thotagamuwa et al., 2023). Portanto, novos estudos devem integrar dados climáticos, biológicos (e.g., fenologia e plasticidade comportamental) e ecológicos para fornecer informações detalhadas sobre os mecanismos subjacentes ao declínio da riqueza de besouros rola-bostas na região do sul da Bahia. A

conservação dessas espécies na região exigirá esforços conjuntos para desenvolver intervenções mais eficazes, incluindo medidas de conservação e mitigação das mudanças climáticas, além de iniciativas para a regeneração florestal e a conservação da fauna. Além disso, destacamos a necessidade de que os espécimes de rola-bosta coletados sejam depositados em coleções de referência e que os dados de distribuição sejam disponibilizados (Cupello et al., 2023), contribuindo assim para reduzir a subamostragem do grupo na região. Os espécimes coletados no presente estudo se encontram-na coleção entomológica da UFMT e parte do material está sendo preparado para depósito na Coleção entomológica do CEPEC/CEPLAC. Por fim, encorajamos o uso conjunto de amostragens em várias escalas espaciais, associadas à investigação da bionomia das espécies, a fim de compreender as respostas das espécies às flutuações climáticas e evitar a perda de espécies no futuro (Levy et al., 2015).

REFERÊNCIAS

- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., and Anderson, R. P. (2015). spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography* 38, 541–545. doi: 10.1111/ecog.01132
- Alcântara, C. O. de, Silva, P. G. da, and Hernández, M. I. M. (2023). Body size and body conditions of two dung beetles species (Coleoptera: Scarabaeidae) related to environmental temperatures. *Rev Bras Entomol* 67. doi: 10.1590/1806-9665-rbent-2022-0099
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., and Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711–728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Anderson, D. J., Berson, J. D., Didham, R. K., Simmons, L. W., and Evans, T. A. (2024). Dung beetles increase plant growth: a meta-analysis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 291. doi: 10.1098/rspb.2023.2885
- Anderson, R. P., and Raza, A. (2010). The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with *montane rodents* (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *J Biogeogr* 37, 1378–1393. doi: 10.1111/j.1365-2699.2010.02290.x
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., et al. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species

distribution modeling. *Ecol Modell* 222, 1810–1819. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011

Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., and Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecol Lett* 15, 365–377. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x

Bellard, C., Leclerc, C., Leroy, B., Bakkenes, M., Veloz, S., Thuiller, W., et al. (2014). Vulnerability of biodiversity hotspots to global change. *Global Ecology and Biogeography* 23, 1376–1386. doi: 10.1111/geb.12228

Bennett, A. C., Rodrigues de Sousa, T., Monteagudo-Mendoza, A., Esquivel-Muelbert, A., Morandi, P. S., Coelho de Souza, F., et al. (2023). Sensitivity of South American tropical forests to an extreme climate anomaly. *Nat Clim Chang* 13, 967–974. doi: 10.1038/s41558-023-01776-4

Bernardino, G. V. dos S., Mesquita, V. P., Bobrowiec, P. E. D., Iannuzzi, L., Salomão, R. P., and Cornelius, C. (2024). Habitat loss reduces abundance and body size of forest-dwelling dung beetles in an Amazonian urban landscape. *Urban Ecosyst.* doi: 10.1007/s11252-024-01520-6

Bicknell, J. E., Phelps, S. P., Davies, R. G., Mann, D. J., Struebig, M. J., and Davies, Z. G. (2014). Dung beetles as indicators for rapid impact assessments: Evaluating best practice forestry in the neotropics. *Ecol Indic* 43, 154–161. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.02.030

Bitencourt, B. S., and da Silva, P. G. (2016). Forest regeneration affects dung beetle assemblages (Coleoptera: Scarabaeinae) in the southern Brazilian Atlantic Forest. *J Insect Conserv* 20, 855–866. doi: 10.1007/s10841-016-9917-3

Bogoni, J. A., da Silva, P. G., and Peres, C. A. (2019). Co-declining mammal–dung beetle faunas throughout the Atlantic Forest biome of South America. *Ecography* 42, 1803–1818. doi: 10.1111/ecog.04670

Bogoni, J. A., Peres, C. A., and Ferraz, K. M. P. M. B. (2020). Extent, intensity and drivers of mammal defaunation: a continental-scale analysis across the Neotropics. *Sci Rep* 10, 14750. doi: 10.1038/s41598-020-72010-w

Boria, R. A., Olson, L. E., Goodman, S. M., and Anderson, R. P. (2014). Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. *Ecol Model* 275, 73–77. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.12.012

- Boria, R. A., Olson, L. E., Goodman, S. M., and Anderson, R. P. (2017). A single-algorithm ensemble approach to estimating suitability and uncertainty: cross-time projections for four Malagasy tenrecs. *Divers Distrib* 23, 196–208. doi: 10.1111/ddi.12510
- Cannon, A. J. (2020). Reductions in daily continental-scale atmospheric circulation biases between generations of global climate models: CMIP5 to CMIP6. *Environmental Research Letters* 15, 064006. doi: 10.1088/1748-9326/ab7e4f
- Cardoso, P., Barton, P. S., Birkhofer, K., Chichorro, F., Deacon, C., Fartmann, T., et al. (2020). Scientists' warning to humanity on insect extinctions. *Biol Conserv* 242, 108426. doi: 10.1016/j.biocon.2020.108426
- Cassano, C. R., Schroth, G., Faria, D., Delabie, J. H. C., and Bede, L. (2009). Landscape and farm scale management to enhance biodiversity conservation in the cocoa producing region of southern Bahia, Brazil. *Biodivers Conserv* 18, 577–603. doi: 10.1007/s10531-008-9526-x
- Cuesta, E., Mingarro, M., and Lobo, J. M. (2021). Between locality variations in the seasonal patterns of dung beetles: the role of phenology in mitigating global warming effects. *Ecol Entomol* 46, 592–600. doi: 10.1111/een.13005
- Cupello, M., Silva, F. A. B., and Vaz-de-Mello, F. Z. (2023). The Taxonomic Revolution of New World dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae). *Front Ecol Evol* 11. doi: 10.3389/fevo.2023.1168754
- da Silva, P. G., and Cassenote, S. (2019). Environmental drivers of species composition and functional diversity of dung beetles along the Atlantic Forest–Pampa transition zone. *Austral Ecol* 44, 786–799. doi: 10.1111/aec.12749
- Davis, A. J., Hanski, I., and Cambefort, Y. (1993). Dung Beetle Ecology. *J Anim Ecol* 62, 396. doi: 10.2307/5374
- de Lima, R. A. F., Oliveira, A. A., Pitta, G. R., de Gasper, A. L., Vibrans, A. C., Chave, J., et al. (2020). The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. *Nat Commun* 11, 6347. doi: 10.1038/s41467-020-20217-w
- de Oliveira, M. E., Gonçalves, C. F., Machado, C. B., and Galetti Jr, P. M. (2024). Modeling responses of Brazilian Atlantic Forest mammals assemble to climate change. *Biodivers Conserv* 33, 463–483. doi: 10.1007/s10531-023-02749-x

- deCastro-Arrazola, I., Andrew, N. R., Berg, M. P., Curtsdotter, A., Lumaret, J., Menéndez, R., et al. (2023). A trait-based framework for dung beetle functional ecology. *Journal of Animal Ecology* 92, 44–65. doi: 10.1111/1365-2656.13829
- Dirzo, R., Young, H. S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N. J. B., and Collen, B. (2014). Defaunation in the Anthropocene. *Science* (1979) 345, 401–406. doi: 10.1126/science.1251817
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., et al. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36, 27–46. doi: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x
- Duffus, N. E., Echeverri, A., Dempewolf, L., Noriega, J. A., Furumo, P. R., and Morimoto, J. (2023). The Present and Future of Insect Biodiversity Conservation in the Neotropics: Policy Gaps and Recommendations. *Neotrop Entomol* 52, 407–421. doi: 10.1007/s13744-023-01031-7
- Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., et al. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29, 129–151. doi: 10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x
- Faria, D., Morante-Filho, J. C., Baumgarten, J., Bovendorp, R. S., Cazetta, E., Gaiotto, F. A., et al. (2023). The breakdown of ecosystem functionality driven by deforestation in a global biodiversity hotspot. *Biol Conserv* 283, 110126. doi: 10.1016/j.biocon.2023.110126
- Ferreira, G. M. D., Leme, E. M. C., Aona, L. Y. S., Souza, F. V.D., Moura, H. C. P., and Souza, E. H. de (2024). Microendemism, high diversity and taxonomic novelties in Bromeliaceae: Studies from an Atlantic Forest hotspot in Bahia, Brazil. *J Nat Conserv* 79, 126599. doi: 10.1016/j.jnc.2024.126599
- Fick, S. E., and Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37, 4302–4315. doi: 10.1002/joc.5086
- Filgueiras, B. K. C., Tabarelli, M., Leal, I. R., Vaz-de-Mello, F. Z., and Iannuzzi, L. (2015). Dung beetle persistence in human-modified landscapes: Combining indicator species with anthropogenic land use and fragmentation-related effects. *Ecol Indic* 55, 65–73. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.02.032

- França, F., Louzada, J., and Barlow, J. (2018). Selective logging effects on ‘brown world’ faecal-detritus pathway in tropical forests: A case study from Amazonia using dung beetles. *For Ecol Manage* 410, 136–143. doi: 10.1016/j.foreco.2017.12.027
- Galetti, M., Brocardo, C. R., Begotti, R. A., Hortenci, L., Rocha-Mendes, F., Bernardo, C. S. S., et al. (2017). Defaunation and biomass collapse of mammals in the largest Atlantic forest remnant. *Anim Conserv* 20, 270–281. doi: 10.1111/acv.12311
- Gotcha, N., Cuthbert, R. N., Machekano, H., and Nyamukondiwa, C. (2022). Density-dependent ecosystem service delivery under shifting temperatures by dung beetles. *Science of The Total Environment* 807, 150575. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150575
- Heming, N. M., Dambros, C., and Gutiérrez, E. E. (2019). ENMwizard: Advanced techniques for Ecological Niche Modeling made easy. Available at: <https://github.com/HemingNM/ENMwizard>
- Hernández, M. I. M., and Vaz-de-Mello, F. Z. (2009). Seasonal and spatial species richness variation of dung beetle (Coleoptera, Scarabaeidae s. str.) in the Atlantic Forest of southeastern Brazil. *Rev Bras Entomol* 53, 607–613. doi: 10.1590/S0085-56262009000400010
- Holley, J. M., and Andrew, N. R. (2020). Warming effects on dung beetle ecosystem services: brood production and dung burial by a tunnelling dung beetle, *Onthophagus taurus* (Coleoptera: Scarabaeidae), is reduced by experimental warming. *Aust Entomol* 59, 353–367. doi: 10.1111/aen.12448
- ICMBio (2018). *Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção: Volume II - Mamíferos*. Brasília.
- Kaky, E., Nolan, V., Alatawi, A., and Gilbert, F. (2020). A comparison between Ensemble and MaxEnt species distribution modelling approaches for conservation: A case study with Egyptian medicinal plants. *Ecol Inform* 60, 101150. doi: 10.1016/j.ecoinf.2020.101150
- Keller, N., van Meerveld, I., Ghazoul, J., Chiew, L. Y., Philipson, C. D., Godoong, E., et al. (2022). Dung beetles as hydrological engineers: effects of tunnelling on soil infiltration. *Ecol Entomol* 47, 84–94. doi: 10.1111/een.13094
- Kirkpatrick, W. H., and Sheldon, K. S. (2022). Experimental increases in temperature mean and variance alter reproductive behaviours in the dung beetle *Phanaeus vindex*. *Biol Lett* 18. doi: 10.1098/rsbl.2022.0109

- Larsen, T. H. (2012). Upslope Range Shifts of Andean Dung Beetles in Response to Deforestation: Compounding and Confounding Effects of Microclimatic Change. *Biotropica* 44, 82–89. doi: 10.1111/j.1744-7429.2011.00768.x
- Levy, O., Buckley, L. B., Keitt, T. H., Smith, C. D., Boateng, K. O., Kumar, D. S., et al. (2015). Resolving the life cycle alters expected impacts of climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282, 20150837. doi: 10.1098/rspb.2015.0837
- Lewinsohn, T. M., Agostini, K., Lucci Freitas, A. V., and Melo, A. S. (2022). Insect decline in Brazil: an appraisal of current evidence. *Biol Lett* 18. doi: 10.1098/rsbl.2022.0219
- Macagno, A. L. M., Zattara, E. E., Ezeakudo, O., Moczek, A. P., and Ledón-Rettig, C. C. (2018). Adaptive maternal behavioral plasticity and developmental programming mitigate the transgenerational effects of temperature in dung beetles. *Oikos* 127, 1319–1329. doi: 10.1111/oik.05215
- Maldaner, M. E., Costa-Silva, V. da, and Vaz-de-Mello, F. Z. (2024). Dung beetles in South American pasturelands. *Biota Neotrop* 24. doi: 10.1590/1676-0611-bn-2023-1567
- Mamantov, M. A., and Sheldon, K. S. (2023). Seasonality, Distribution, and Diversity of Dung Beetles (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae, Aphodiinae and Geotrupidae: Geotrupinae) in Great Smoky Mountains National Park, USA. *Coleopt Bull* 77. doi: 10.1649/0010-065X-77.3.285
- Morgan Fleming, J., Carter, A. W., and Sheldon, K. S. (2021). Dung beetles show metabolic plasticity as pupae and smaller adult body size in response to increased temperature mean and variance. *J Insect Physiol* 131, 104215. doi: 10.1016/j.jinsphys.2021.104215
- Mota, F. M. M., Alves-Ferreira, G., Talora, D. C., and Heming, N. M. (2023). divraster: an R package to calculate taxonomic, functional and phylogenetic diversity from rasters. *Ecography* 2023. doi: 10.1111/ecog.06905
- Muscarella, R., Galante, P. J., Soley-Guardia, M., Boria, R. A., Kass, J. M., Uriarte, M., et al. (2014). ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods Ecol Evol* 5. doi: 10.1111/2041-210X.12261
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., and Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. doi: 10.1038/35002501

- Nervo, B., Caprio, E., Celi, L., Lonati, M., Lombardi, G., Falsone, G., et al. (2017). Ecological functions provided by dung beetles are interlinked across space and time: evidence from ¹⁵N isotope tracing. *Ecology* 98, 433–446. doi: 10.1002/ecy.1653
- Nervo, B., Roggero, A., Chamberlain, D., Caprio, E., Rolando, A., and Palestini, C. (2021). Physiological, morphological and ecological traits drive desiccation resistance in north temperate dung beetles. *BMC Zool* 6, 26. doi: 10.1186/s40850-021-00089-3
- Nervo, B., Tocco, C., Caprio, E., Palestini, C., and Rolando, A. (2014). The Effects of Body Mass on Dung Removal Efficiency in Dung Beetles. *PLoS One* 9, e107699. doi: 10.1371/journal.pone.0107699
- Nichols, E., Gardner, T. A., Peres, C. A., and Spector, S. (2009). Co-declining mammals and dung beetles: an impending ecological cascade. *Oikos* 118, 481–487. doi: 10.1111/j.1600-0706.2008.17268.x
- Nichols, E., Spector, S., Louzada, J., Larsen, T., Amezquita, S., and Favila, M. E. (2008). Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. *Biol Conserv* 141, 1461–1474. doi: 10.1016/j.biocon.2008.04.011
- Nyamukondiwa, C., Chidawanyika, F., Machekano, H., Mutamiswa, R., Sands, B., Mgidiwa, N., et al. (2018). Climate variability differentially impacts thermal fitness traits in three coprophagous beetle species. *PLoS One* 13, e0198610. doi: 10.1371/journal.pone.0198610
- Oliveira-Silva, A. E. de, Piratelli, A. J., Zurell, D., and da Silva, F. R. (2022). Vegetation cover restricts habitat suitability predictions of endemic Brazilian Atlantic Forest birds. *Perspect Ecol Conserv* 20. doi: 10.1016/j.pecon.2021.09.002
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., et al. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Clim Change* 122, 387–400. doi: 10.1007/s10584-013-0905-2
- Ostroski, P., Saiter, F. Z., Amorim, A. M., and Fiaschi, P. (2020). Angiosperm endemism in a Brazilian Atlantic Forest biodiversity hot-point. *Brazilian Journal of Botany* 43, 397–404. doi: 10.1007/s40415-020-00603-w
- Pardini, R., Faria, D., Accacio, G. M., Laps, R. R., Mariano-Neto, E., Paciencia, M. L. B., et al. (2009). The challenge of maintaining Atlantic forest biodiversity: A multi-taxa conservation assessment of specialist and generalist species in an agro-forestry mosaic in southern Bahia. *Biol Conserv* 142, 1178–1190. doi: 10.1016/j.biocon.2009.02.010

- Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 37, 637–669. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100
- Pérez-Méndez, N., Jordano, P., García, C., and Valido, A. (2016). The signatures of Anthropocene defaunation: cascading effects of the seed dispersal collapse. *Sci Rep* 6, 24820. doi: 10.1038/srep24820
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., and Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol Modell* 190, 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- Pinto Leite, C. M., Mariano-Neto, E., and Rocha, P. L. B. da (2018). Biodiversity thresholds in invertebrate communities: The responses of dung beetle subgroups to forest loss. *PLoS One* 13, e0201368. doi: 10.1371/journal.pone.0201368
- Prieto-Torres, D. A., Lira-Noriega, A., and Navarro-Sigüenza, A. G. (2020). Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests. *Perspect Ecol Conserv* 18, 19–30. doi: 10.1016/j.pecon.2020.01.002
- QGIS (2023). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. Available at: <https://qgis.org/en/site/forusers/index.html>
- R Core Team (2023). R: The R Project for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at: <https://www.r-project.org/>
- Rezende, C. L., Scarano, F. R., Assad, E. D., Joly, C. A., Metzger, J. P., Strassburg, B. B. N., et al. (2018). From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspect Ecol Conserv* 16, 208–214. doi: 10.1016/j.pecon.2018.10.002
- Roberts, D. R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M. S., Elith, J., Guillera-Arroita, G., et al. (2017). Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography* 40, 913–929. doi: 10.1111/ecog.02881
- Rojas-Padilla, O., Menezes, V. Q., Dias, I. R., Argôlo, A. J. S., Solé, M., and Orrico, V. G. D. (2020). Amphibians and reptiles of Parque Nacional da Serra das Lontras: an important center of endemism within the Atlantic Forest in southern Bahia, Brazil. *Zookeys* 1002, 159–185. doi: 10.3897/zookeys.1002.53988

- Salomão, R. P., Favila, M. E., and González-Tokman, D. (2020). Spatial and temporal changes in the dung beetle diversity of a protected, but fragmented, landscape of the northernmost Neotropical rainforest. *Ecol Indic* 111, 105968. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105968
- Shcheglovitova, M., and Anderson, R. P. (2013). Estimating optimal complexity for ecological niche models: A jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecol Model* 269, 9–17. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.08.011
- Silva, J. L. da, and Vaz-de-Mello, F. Z. (2020). Areas of endemism in the Brazilian Atlantic Forest based on the distribution of dung beetles (Coleoptera, Scarabaeidae, Scarabaeinae). *Iheringia Ser Zool* 110. doi: 10.1590/1678-4766e2020003
- Simberloff, D., Martin, J.-L., Genovesi, P., Maris, V., Wardle, D. A., Aronson, J., et al. (2013). Impacts of biological invasions: what's what and the way forward. *Trends Ecol Evol* 28, 58–66. doi: 10.1016/j.tree.2012.07.013
- Slade, E. M., Riutta, T., Roslin, T., and Tuomisto, H. L. (2016a). The role of dung beetles in reducing greenhouse gas emissions from cattle farming. *Sci Rep* 6, 18140. doi: 10.1038/srep18140
- Slade, E. M., Roslin, T., Santalahti, M., and Bell, T. (2016b). Disentangling the ‘brown world’ faecal–detritus interaction web: dung beetle effects on soil microbial properties. *Oikos* 125, 629–635. doi: 10.1111/oik.02640
- Souza, T. B., França, F. M., Barlow, J., Dodonov, P., Santos, J. S., Faria, D., et al. (2020). The relative influence of different landscape attributes on dung beetle communities in the Brazilian Atlantic forest. *Ecol Indic* 117, 106534. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106534
- Souza, Y., Gonçalves, F., Lautenschlager, L., Akkawi, P., Mendes, C., Carvalho, M. M., et al. (2019). ATLANTIC MAMMALS: a data set of assemblages of medium- and large-sized mammals of the Atlantic Forest of South America. *Ecology* 100. doi: 10.1002/ecy.2785
- Thomas, J. A., Telfer, M. G., Roy, D. B., Preston, C. D., Greenwood, J. J. D., Asher, J., et al. (2004). Comparative Losses of British Butterflies, Birds, and Plants and the Global Extinction Crisis. *Science* (1979) 303, 1879–1881. doi: 10.1126/science.1095046
- Thomas, W. W., Carvalho, A. M. V. D., Amorim, A. M. A., Garrison, J., and Arbelaez, A. L. (1998). Plant endemism in two forests in southern Bahia, Brazil. *Biodivers Conserv* 7, 311–322. doi: 10.1023/A:1008825627656

- Thotagamuwa, A., Noriega, J. A., Webb, S., Weston, P., Doube, B. M., Caron, V., et al. (2023). Rearing dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae): Identifying knowledge gaps and future challenges. *Entomologia Generalis* 43, 751–769. doi: 10.1127/entomologia/2023/1716
- Trew, B. T., and Maclean, I. M. D. (2021). Vulnerability of global biodiversity hotspots to climate change. *Global Ecology and Biogeography* 30, 768–783. doi: 10.1111/geb.13272
- Vancine, M. H., Muylaert, R. L., Niebuhr, B. B., Oshima, J. E. de F., Tonetti, V., Bernardo, R., et al. (2024). The Atlantic Forest of South America: Spatiotemporal dynamics of the vegetation and implications for conservation. *Biol Conserv* 291, 110499. doi: 10.1016/j.biocon.2024.110499
- Vickers, K., and Buckland, P. I. (2015). Predicting island beetle faunas by their climate ranges: the *tabula rasa* /refugia theory in the North Atlantic. *J Biogeogr* 42, 2031–2048. doi: 10.1111/jbi.12593
- Wagner, D. L., Grames, E. M., Forister, M. L., Berenbaum, M. R., and Stopak, D. (2021). Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118. doi: 10.1073/pnas.2023989118
- Wisz, M. S., Hijmans, R. J., Li, J., Peterson, A. T., Graham, C. H., and Guisan, A. (2008). Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Divers Distrib* 14, 763–773. doi: 10.1111/j.1472-4642.2008.00482.x
- Yamada, D., Imura, O., Shi, K., and Shibuya, T. (2007). Effect of tunneler dung beetles on cattle dung decomposition, soil nutrients and herbage growth. *Grassl Sci* 53, 121–129. doi: 10.1111/j.1744-697X.2007.00082.x
- Zizka, A., Silvestro, D., Andermann, T., Azevedo, J., Duarte Ritter, C., Edler, D., et al. (2019). CoordinateCleaner: Standardized cleaning of occurrence records from biological collection databases. *Methods Ecol Evol* 10, 744–751. doi: 10.1111/2041-210X.13152

CONCLUSÃO GERAL

Os resultados deste estudo destacam a importância da preservação das áreas florestais da Mata Atlântica no sul da Bahia para manter a diversidade e funcionalidade ecológica das assembleias de besouros rola-bostas. Projeções climáticas indicam uma significativa perda de habitats adequados para esses besouros, especialmente em cenários pessimistas, ressaltando a vulnerabilidade do gênero *Dichotomius*. Além disso, a utilização de fármacos médico-veterinários representa uma séria ameaça, com impactos negativos significativos sobre essas populações. No Brasil, faltam medidas eficazes para mitigar os efeitos adversos do uso desses medicamentos nos besouros rola-bostas. A aplicação de produtos veterinários deve ser restrita a animais parasitados, com estrita observância das regras e dosagens especificadas, e o incentivo ao uso de alternativas fitoterápicas é necessário. Observamos a necessidade urgente de criar um protocolo padronizado para monitorar os efeitos desses fármacos em organismos não-alvo, particularmente nas assembleias de besouros rola-bostas, para garantir os serviços ecossistêmicos essenciais que esses organismos proporcionam à produção agropecuária. Destacamos que o uso de fármacos médico-veterinários deve ser rigorosamente monitorado, e alternativas menos impactantes devem ser consideradas.

Este estudo ressalta a importância da manutenção da cobertura florestal para a preservação da diversidade das assembleias de besouros rola-bostas, assim como da criação de áreas destinadas à regeneração e conservação na Mata Atlântica do sul da Bahia, uma região notável pela sua diversidade e altos índices de endemismo. A conservação da diversidade dessas assembleias depende do manejo adequado do uso da terra e da preservação dos fragmentos remanescentes de Mata Atlântica. Recomendamos que novos estudos integrem dados climáticos, biológicos e ecológicos para fornecer *insights* mais detalhados sobre os mecanismos subjacentes ao declínio observado na riqueza de besouros rola-bostas. A conservação dessas espécies na região exigirá esforços conjuntos para desenvolver intervenções mais eficazes, incluindo medidas de conservação, mitigação das mudanças climáticas, e iniciativas para a regeneração florestal e conservação da fauna.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Os materiais suplementares deste trabalho estão disponíveis no link:

https://drive.google.com/drive/folders/1rqFxaXWWf1HahNrcLqP6qAdFPGE-WI8A?usp=drive_link

