



ARNOL CARDOZO RUEDA

**DIVERSIDADE DE BESOUROS ROLA-BOSTAS
(COLEOPTERA: SCARABAEINAE) EM CENÁRIOS
SIMULADOS DE SUBSTITUIÇÕES ENTRE FLORESTAS
NATIVAS E PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO NA AMAZÔNIA**

LAVRAS-MG

2024

ARNOL CARDOZO RUEDA

**DIVERSIDADE DE BESOUROS ROLA-BOSTAS (COLEOPTERA:
SCARABAEINAE) EM CENÁRIOS SIMULADOS DE SUBSTITUIÇÕES ENTRE
FLORESTAS NATIVAS E PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Entomologia, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Júlio Neil Cassa Louzada

Orientador

Prof. Dr. Wallace Beiroz Imbrosio da Silva

Coorientador

LAVRAS-MG

2024

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Rueda, Arnol Cardozo.

Diversidade de besouros rola-bostas (Coleoptera: Scarabaeinae)
em cenários simulados de substituições entre florestas nativas e
plantações de eucalipto na Amazônia / Arnol Cardozo Rueda. -
2024.

46 p.

Orientador(a): Julio Neil Cassa Louzada.

Coorientador(a): Wallace Beiroz Imbrosio da Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Árvores exóticas. 2. Substituição de habitats. 3. Diversidade.
I. Cassa Louzada, Julio Neil. II. Imbrosio da Silva, Wallace Beiroz.
III. Título.

ARNOL CARDOZO RUEDA

**DIVERSIDADE DE BESOUROS ROLA-BOSTAS (COLEOPTERA:
SCARABAEINAE) EM CENÁRIOS SIMULADOS DE SUBSTITUIÇÕES ENTRE
FLORESTAS NATIVAS E PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO NA AMAZÔNIA**

**DIVERSITY OF DUNG BEETLES (COLEOPTERA: SCARABAEINAE) IN
SIMULATED SCENARIOS OF SUBSTITUTIONS BETWEEN NATIVE FORESTS
AND EUCALYPTUS PLANTATIONS IN THE AMAZON**

Dissertação apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Entomologia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 28 de novembro de 2024.

Dr. Julio Neil Cassa Louzada UFLA

Dr. Vanesca Korasaki UEMG

Dr. Ronald Zanetti Bonetti Filho UFLA

Prof. Dr. Júlio Neil Cassa Louzada

Orientador

Prof. Dr. Wallace Beiroz Imbrosio da Silva

Coorientador

LAVRAS-MG

2024

À minha mãe *Luz Dary*, que confia no meu processo, me acompanha, compreendeu e é meu suporte, além de ser a pessoa mais orgulhosa de mim. Ao meu pai e ao meu irmão (*in memoriam*), que, embora com pouco ou nenhum tempo vivido, minha memória nunca esquece de vocês.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Entomologia (DEN) e ao Programa de Pós-Graduação em Entomologia, pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudos.

Gostaria de agradecer ao meu orientador Dr. Júlio Louzada não apenas por me receber, mas também por me mostrar sua hospitalidade (um ser humano incrível) para começar este caminho, também por se tornar professor de português, de cultura, música, gastronomia, política, filosofia e me ensinar o Brasil dentro de muitos Brasis. Agradeço seu tempo, paciência e valiosas sugestões para o desenvolvimento deste trabalho, além de sua amizade, confiar em alguém que não joga futebol e pelos dias de “terapia”. Gracias totales¡¡

Ao meu Coorientador Dr. Wallace Beiroz, obrigado por fazer parte deste caminho, agradeço o seu tempo, paciência, pelas trocas de ideias e filosofar! É claramente pelas contribuições para este trabalho. Gracias!

À minha mãe e irmãos (minha família), obrigado pelo apoio e amor infinito, por entenderem e serem meu suporte nos dias difíceis à distância. Esta conquista é nossa!

Agradeço aos amigos que encontrei ao longo do caminho, aqueles que, mesmo à distância, estiveram presentes, ouviram e aconselharam: Marily Mendoza e David Vanegas, muito obrigado! vocês têm um lugar especial em mim.

Aos amigos que chegam sem querer e ficam no coração, obrigado Angie!!

À novos amigos que Lavras me deu: Ju (Juleane) e Igor, obrigado por abrirem suas portas para mim, pessoas maravilhosas (obrigado pelas aulas de português).

À segunda família que encontrei no caminho, obrigado, pessoal: Daniela, Jherson, Juanito, Dani pequena.

Aos meninos em casa, obrigado Felipe e Pablo, foram dois anos cheios de aprendizagem, paciência y doideras.

As amigas do setor de ecologia e entomologia. E, ao mundo de pessoas que direta ou indiretamente fizeram parte desta primeira etapa.

A meu tem “rola-bosteiros”, Kamila, Debora, Luiz, Raphael e Pablo, obrigado pela amizade, apoio, e convivência no laboratório, também pela paciência e aulas extracurriculares de português.

Finalmente, este trabalho representa a conclusão de uma etapa importante da minha vida. Citando "Los Nadie" de Eduardo Galeano: hoje são 26 anos indo contra um sistema, contra o esperado e contra os poucos. Mas esse caminho não foi fácil. No entanto, agradeço a muitas pessoas, amigos, amigas e um ou outro desconhecido que não tenho como listar aqui, que contribuíram para me construir e, muitas vezes, me desconstruir para sempre melhorar. Gratidão infinita.

"Al fin y al cabo, somos lo que hacemos, pero somos, principalmente, lo que hacemos para cambiar lo que somos."

“Somos o que fazemos, mas somos principalmente o que fazemos para mudar o que somos”

(Eduardo Galeano

RESUMO

A transformação de paisagens naturais pela conversão do uso da terra é um fenômeno global que impacta a biodiversidade e as dinâmicas ecológicas. A expansão das plantações de eucalipto, impulsionada por sua rentabilidade econômica e pela crescente demanda por produtos florestais, tornou-se comum em muitas regiões tropicais. No entanto, essas plantações alteram drasticamente a estrutura e a composição dos ecossistemas, afetando os padrões de diversidade. Essa transformação gera heterogeneidade na paisagem, resultante da coexistência de diferentes tipos de habitats, o que desempenha um papel crucial na dinâmica das comunidades biológicas. Em grupos de insetos, como os escarabeíneos (besouros rola-bosta), a interação entre plantações de eucalipto e áreas florestais pode gerar padrões complexos de diversidade, com respostas distintas das comunidades ao longo do espaço e do tempo. Esta dissertação propõe explorar, por meio de cenários simulados baseados em dados reais, como a substituição simultânea de áreas florestais por plantações de eucalipto impacta as comunidades de besouros rola-bosta. O foco está nos efeitos da substituição de habitats sobre a diversidade dessas comunidades e suas respostas em diferentes métricas de diversidade. A dissertação está dividida em três partes: na primeira, apresenta-se um marco teórico baseado em conceitos gerais; na segunda, uma introdução ao tema; e na terceira, são apresentados os resultados, nos quais investigamos as respostas das comunidades de besouros rola-bosta à substituição de habitats entre florestas e plantações de eucalipto. Para isso, realizamos simulações de cenários de substituição, com o objetivo de avaliar como diferentes proporções de eucalipto e floresta impactam a diversidade dessas comunidades. Nossos resultados, derivados dos cenários simulados de substituição de habitat entre áreas florestais e plantações de eucalipto, evidenciam a complexidade e a assimetria nas respostas das comunidades de rola-bosta diante das mudanças no uso da terra. Observamos que a conversão de áreas florestais em eucalipto resulta em uma diminuição da riqueza e abundância de espécies, enquanto o cenário inverso promove uma recuperação parcial, mas não completa. Embora a coexistência de ambos os tipos de habitat, em proporções menores, possa manter certa heterogeneidade na estrutura da paisagem, essa configuração influencia a diversidade composicional das comunidades. Demonstramos que o aumento de eucalipto leva a uma dissimilaridade entre locais, o que pode mascarar a perda de espécies.

Palavras-chave: Árvores exóticas; paisagens modificadas; Amazônia; diversidade regional

ABSTRACT

The transformation of natural landscapes through land-use conversion is a global phenomenon that impacts biodiversity and ecological dynamics. The expansion of eucalyptus plantations, driven by their economic profitability and the growing demand for forest products, has become common in many tropical regions. However, these plantations drastically alter the structure and composition of ecosystems, affecting diversity patterns. This transformation generates landscape heterogeneity, resulting from the coexistence of different habitat types, which plays a crucial role in the dynamics of biological communities. In insect groups, such as dung beetles (Scarabaeinae), the interaction between eucalyptus plantations and forest areas can generate complex diversity patterns, with distinct community responses across space and time. This dissertation proposes to explore, through simulated scenarios based on real data, how the simultaneous replacement of forest areas with eucalyptus plantations impacts dung beetle communities. The focus is on the effects of habitat replacement on the diversity of these communities and their responses across different diversity metrics. The dissertation is divided into three parts: the first presents a theoretical framework based on general concepts; the second introduces the topic; and the third presents the results, where we investigate the responses of dung beetle communities to habitat replacement between forests and eucalyptus plantations. To achieve this, we conducted simulations of replacement scenarios to evaluate how different proportions of eucalyptus and forest impact the diversity of these communities. Our results, derived from simulated scenarios of habitat replacement between forest areas and eucalyptus plantations, highlight the complexity and asymmetrical responses of dung beetle communities to land-use changes. We observed that the conversion of forest areas into eucalyptus plantations results in a decrease in species richness and abundance, while the reverse scenario promotes partial, but not complete, recovery. Although the coexistence of both habitat types in smaller proportions can maintain some heterogeneity in the landscape structure, this configuration influences the compositional diversity of communities. We demonstrated that an increase in eucalyptus leads to dissimilarity between sites, which can mask species loss.

Keywords: Exotic trees; modified landscapes; Amazon; regional diversity

Impactos sociais, tecnológicos, econômicos e culturais

A pesquisa investiga os impactos da substituição de florestas nativas por plantações de eucalipto na Amazônia sobre a diversidade de besouros rola-bosta, utilizando cenários simulados baseados em dados reais. O estudo tem como objetivo avaliar como diferentes proporções de substituição florestal impactam a diversidade de besouros em termos de riqueza, diversidade gama e beta diversidade. Foram analisadas 102 espécies coletadas em 65 sítios de floresta e 75 sítios de eucalipto, demonstrando que a conversão de áreas florestais para plantações resulta em uma redução significativa na riqueza e abundância de espécies, enquanto a substituição inversa promove uma recuperação parcial da biodiversidade. Esses achados apresentam impactos ambientais e científicos diretos, contribuindo para a compreensão das respostas da biodiversidade às mudanças no uso da terra e fornecendo subsídios para políticas de conservação e manejo sustentável. Os impactos obtidos incluem evidências sobre a perda de biodiversidade em resposta à conversão do uso da terra, fornecendo informações valiosas para a formulação de políticas públicas e estratégias de manejo sustentável. O estudo gera impactos ambientais diretos ao quantificar os efeitos da substituição florestal, além de impactos tecnológicos e econômicos, uma vez que os dados podem ser utilizados por gestores ambientais e empresas do setor florestal para equilibrar conservação e produção. O impacto social e cultural da pesquisa se manifesta na produção de conhecimento aplicável a comunidades locais e formuladores de políticas públicas, promovendo a conscientização sobre a importância da biodiversidade em paisagens produtivas. O caráter extensionista do estudo é evidenciado pela interação com a sociedade externa à UFLA, incluindo a participação de um coorientador vinculado a outra universidade, ampliando a cooperação científica interinstitucional. Além disso, foram desenvolvidas ações de divulgação científica para o público não acadêmico, por meio de mídias sociais e materiais de divulgação acessíveis, atingindo um público mais amplo, incluindo comunidades locais. A pesquisa se enquadra nas áreas temáticas da Política Nacional de Extensão, com destaque para (5) Meio Ambiente, devido à avaliação dos impactos ecológicos, e (7) Tecnologia e Produção, por fornecer novas informações para a sustentabilidade florestal. Além disso, estabelece conexão com (2) Cultura, pela disseminação do conhecimento ecológico. O estudo está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, contribuindo diretamente para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) e ODS 15 (Vida Terrestre). Os impactos são concretos, ao fornecer dados quantificáveis sobre a perda de biodiversidade, e potenciais, ao possibilitar futuras ações de manejo sustentável e extensão ambiental. Dessa forma, o estudo fortalece o diálogo entre academia, setor produtivo e sociedade, promovendo práticas de conservação baseadas em ciência.

Social, technological, economic and cultural impacts

The research investigates the impacts of replacing native forests with eucalyptus plantations on the Amazon on dung beetle diversity, using simulated scenarios based on real data. The study aims to assess how different proportions of forest replacement affect beetle diversity in terms of species richness, gamma diversity, and beta diversity. A total of 102 species

were analyzed, collected from 65 native forest sites and 75 eucalyptus plantation sites. The results demonstrate that converting forest areas to plantations leads to a significant reduction in species richness and abundance, while the reverse process (replacing plantations with forests) promotes partial, but not complete, biodiversity recovery. These findings have direct environmental and scientific implications, contributing to the understanding of biodiversity responses to land-use changes and providing scientific evidence for conservation policies and sustainable management. The study highlights the loss of biodiversity due to land-use conversion, offering valuable insights into public policies and sustainable management strategies. It generates direct environmental impacts by quantifying the effects of forest replacement, as well as technological and economic impacts, as the data can be used by environmental managers and forestry companies to balance conservation and production goals. The social and cultural impact of the research lies in its ability to generate knowledge applicable to local communities and policymakers, raising awareness about the importance of biodiversity in productive landscapes. The extensionist nature of the study is reflected in its engagement with society beyond UFLA, including the participation of a co-advisor affiliated with another university, which strengthens interinstitutional scientific cooperation. Additionally, science outreach activities were developed for non-academic audiences through social media and accessible dissemination materials, reaching a broader public, including local communities. The research aligns with the thematic areas of the National Extension Policy, particularly (5) Environment, due to its assessment of ecological impacts, and (7) Technology and Production, as it provides new insights for forest sustainability. It also connects to (2) Culture, by promoting the dissemination of ecological knowledge. The study is aligned with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), directly contributing to SDG 12 (Responsible Consumption and Production), SDG 13 (Climate Action), and SDG 15 (Life on Land). The impacts are both concrete, through the provision of quantifiable data on biodiversity loss, and potential, by enabling future sustainable management and environmental extension initiatives. In this way, the study strengthens the dialogue between academia, the productive sector, and society, promoting science-informed conservation practices.

SUMÁRIO

1. PARTE I: MARCO TEÓRICO.....	13
1.2. Mudança no uso da terra e biodiversidade	13
1.2.1. Heterogeneidade da paisagem e plantações florestais exóticas	15
1.2.2. Besouros Rola-bosta	16
1.2.3. Cenários de simulação como ferramenta de análises.....	17
2. REFERÊNCIAS	18
3. PARTE II.....	22
3.1. INTRODUÇÃO GERAL.....	22
3.2. REFERÊNCIAS.....	24
4. PARTE III-ARTIGO.....	28
4.1 ARTIGO.....	28
4.2. Introduction	29
4.3. Material and Methods.....	30
4.4. Study area	31
4.5. Sampling protocol	31
4.6. Habitat replacement scenarios.....	32
4.7. Data analysis.....	33
4.8. Results	33
4.8.1. Dung beetles' local richness and abundance	33
4.8.2. Regional diversity of dung beetles	36
4.9. Discussion.....	39
4.9.1. Scale, direction of change, and heterogeneity as factors in the response of dung beetle diversity	39
4.9.2. Effects of habitat substitution on community homogenization and landscape heterogeneity	41
5. Conclusion.....	42
5.1. Acknowledgments.....	43
6. References	43
7. Parte IV: Divulgação científica.....	45
7.1. Média de divulgação: rede social para divulgação	46
.....	46
7.2. Divulgação de informações para comunidades não acadêmicas	47

1. PARTE I: MARCO TEÓRICO

1.2. Mudança no uso da terra e biodiversidade

A mudança do uso da terra é uma das principais ameaças à biodiversidade global (IPBES, 2019), impulsionada principalmente pela expansão da agricultura, urbanização e conversão de ecossistemas naturais em paisagens antropizadas (NEWBOLD et al., 2015). De uma perspectiva ecológica, a transformação de habitats naturais implica a redução da heterogeneidade ambiental e a simplificação estrutural dos ecossistemas, o que impacta diretamente a diversidade de espécies ao alterar a disponibilidade de recursos e a estrutura das comunidades (ISBELL et al., 2017). No entanto, os efeitos da mudança do uso da terra sobre a biodiversidade variam de acordo com a intensidade e a escala da transformação (NEWBOLD et al., 2015; SEMENCHUK et al., 2022), afetando a abundância e diversidade de espécies, juntamente com os serviços ecossistêmicos, devido à homogeneização da paisagem e à diminuição de sua complexidade estrutural (HASAN et al., 2020).

A crescente demanda por alimentos, matérias-primas e espaço urbano acelerou a perda de ecossistemas naturais, priorizando benefícios econômicos de curto prazo sobre as consequências de longo prazo, como a diminuição da biodiversidade, a degradação dos solos e a alteração dos ciclos biogeoquímicos (FOLEY et al., 2005; IPBES, 2019; CHEN et al., 2024). Essa abordagem não apenas compromete a estabilidade dos ecossistemas, mas também a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas necessidades básicas (HALLAJ et al., 2024). No caso das florestas tropicais, a expansão de cultivos agrícolas, pastagens e plantações reduz a cobertura florestal e altera dinâmicas ecológicas-chave, como a polinização e a dispersão de sementes, afetando as espécies (FELIPE-LUCIA et al., 2020). Segundo a FAO (2021) embora a superfície florestal mundial cubra 4,060 bilhões de hectares (31% da área terrestre), apenas 1,100 bilhão correspondem a florestas primárias não alteradas significativamente pela atividade humana. No que diz respeito às florestas plantadas, estas abrangem cerca de 294 milhões de hectares, representando aproximadamente 7% da superfície florestal mundial. Esse tipo de floresta tem experimentado crescimento nas últimas décadas, impulsionado pela demanda de madeira e produtos florestais (FAO, 2021).

As plantações florestais tornaram-se um dos principais impulsionadores do desmatamento em regiões tropicais e subtropicais, substituindo florestas nativas por monocultivos de rápido crescimento destinados à produção de madeira, celulose e

biocombustíveis (FAO, 2021). Diferentemente das florestas naturais, as plantações geralmente se caracterizam por uma estrutura simplificada, menor heterogeneidade ambiental e um ciclo de vida mais curto, o que limita sua capacidade de sustentar comunidades biológicas diversas (MARTELLO et al., 2024a). Seu impacto sobre a biodiversidade depende, em grande medida, de fatores como a escala de implementação, a composição de espécies utilizadas e a conectividade com remanescentes de vegetação natural (LÓPEZ-BEDOYA et al., 2021). Além disso, as diferenças na biodiversidade entre as plantações florestais e os ecossistemas naturais podem ser explicadas, em grande parte, pelos contrastes nas condições bióticas e abióticas que existem entre ambos (WANG et al., 2019).

À medida que a expansão das plantações continua, é provável que seus impactos negativos se intensifiquem com o tempo, afetando a resiliência e a estabilidade das comunidades biológicas (BEIROZ et al., 2019). A homogeneização da paisagem e a diminuição da complexidade estrutural podem comprometer a funcionalidade dos ecossistemas (LOUZADA et al., 2010), reduzindo sua capacidade de sustentar redes tróficas e processos ecológicos essenciais, como a dispersão de sementes e a reciclagem de nutrientes (MENÉNDEZ et al., 2024). Além disso, de uma perspectiva da biodiversidade, esses efeitos variam de acordo com a escala de análise: em nível local (diversidade alfa), algumas espécies podem persistir nesses ambientes, enquanto em nível regional (diversidade beta e gama), a simplificação da paisagem pode reduzir a diversidade total ao eliminar gradientes ambientais e alterar processos ecológicos (REGOLIN et al., 2020; DAMBROS et al., 2024).

Nesse contexto, embora as plantações de eucalipto não possam substituir a biodiversidade das florestas nativas, estratégias de manejo que aumentem a heterogeneidade do habitat e favoreçam a conectividade ecológica poderiam mitigar seus efeitos negativos (TAVARES et al., 2019). Dado que o impacto da conversão do uso da terra varia de acordo com a escala e a proporção de substituição, avaliar como a biodiversidade responde a diferentes níveis de substituição é crucial para identificar limiares críticos onde a transformação da paisagem gera perdas irreversíveis de diversidade. Compreender essas dinâmicas não apenas permite dimensionar os efeitos ecológicos da expansão das plantações florestais, mas também projetar estratégias de conservação e manejo que minimizem seus impactos nos ecossistemas naturais.

1.2.1. Heterogeneidade da paisagem e plantações florestais exóticas

A mudança no uso da terra gera paisagens heterogêneas que combinam diferentes tipos de habitat (TONETTI et al., 2023). Essa variabilidade espacial pode influenciar a distribuição e abundância de espécies, uma vez que diferentes organismos respondem de maneira distinta às mudanças no ambiente (FAHRIG et al., 2011; PRIYADARSHANA et al., 2024). A heterogeneidade da paisagem favorece a coexistência de espécies ao proporcionar uma diversidade de nichos ecológicos, permitindo que tanto espécies generalistas quanto especializadas encontrem os recursos necessários para sua sobrevivência (TEWS et al., 2004). Essa ideia sustenta-se na hipótese da heterogeneidade ambiental, que postula que paisagens diversas promovem uma maior riqueza de espécies ao oferecer uma variedade de condições e recursos (STEIN; GERSTNER; KREFT, 2014). No entanto, quando as mudanças no uso da terra reduzem a variabilidade ambiental e simplificam a estrutura do ecossistema, muitas espécies especializadas desaparecem, enquanto as generalistas e oportunistas podem prosperar (REGOLIN et al., 2020).

Embora essas plantações sejam frequentemente consideradas menos favoráveis para a conservação de espécies devido à sua estrutura simplificada e baixa heterogeneidade ambiental, estudos recentes sugerem uma perspectiva mais matizada (TAVARES et al., 2019). Por exemplo, em paisagens altamente degradadas ou severamente fragmentadas, as plantações exóticas podem fornecer habitats alternativos para certas espécies, atuando como refúgios temporários ou corredores de conectividade (LINDENMAYER, 2016). No entanto, o impacto das plantações exóticas sobre a heterogeneidade da paisagem não é uniforme e depende de fatores como: (1) a escala de implementação; em escalas maiores, as plantações tendem a gerar paisagens mais homogêneas, enquanto em escalas menores podem coexistir com fragmentos de vegetação natural, mantendo certa heterogeneidade (LINDENMAYER, 2016); (2) o tipo de manejo florestal; práticas como a diversificação de espécies, a conservação de corredores biológicos e a integração de áreas naturais dentro das plantações podem aumentar a heterogeneidade estrutural, mitigando alguns de seus efeitos negativos sobre a biodiversidade (HARTLEY, 2002); e (3) o contexto da paisagem; em paisagens altamente degradadas ou fragmentadas, as plantações exóticas podem atuar como elementos de conectividade, fornecendo habitats alternativos para algumas espécies (TAVARES et al., 2019).

Essas práticas não apenas aumentam a heterogeneidade estrutural da paisagem, mas também promovem a recuperação de funções ecológicas e a provisão de serviços ecossistêmicos, sugerindo que um manejo adequado pode transformar as plantações exóticas

em elementos menos prejudiciais e até benéficos em contextos específicos (MENÉNDEZ et al., 2024). Estudos como os de (BEIROZ et al., 2018), demonstram que, mesmo em paisagens dominadas por plantações de eucalipto, a presença de fragmentos de vegetação nativa pode reduzir os efeitos negativos sobre a biodiversidade, destacando a importância de manter a heterogeneidade da paisagem. No entanto, algumas perguntas persistem no âmbito desse debate. Por exemplo, como a biodiversidade interage com a heterogeneidade da paisagem gerada pela perturbação da introdução gradual de plantios? Até o momento, não houve uma resposta clara, e os estudos têm apresentado resultados contrastantes em relação à interação entre a proporção da perturbação e a paisagem circundante (LUNDHOLM, 2009; LINDENMAYER, 2016)

1.2.2. Besouros Rola-bosta

As comunidades de besouros rola-bosta (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae) são amplamente reconhecidas como bioindicadores eficazes para avaliar mudanças na estrutura e funcionalidade dos ecossistemas, especialmente em paisagens modificadas por atividades humanas (NICHOLS et al., 2007). Em particular, as plantações de espécies não nativas (*Eucalyptus* spp.) alteram drasticamente a heterogeneidade natural da paisagem, reduzindo a diversidade de habitats e simplificando a estrutura do ecossistema (BROCKERHOFF et al., 2013). Essas transformações têm efeitos significativos sobre a biodiversidade, pois muitas espécies especializadas, incluindo os besouros rola-bosta, dependem da complexidade estrutural e da disponibilidade de recursos específicos para sua sobrevivência (BRAGA et al., 2013). Nesse contexto, os besouros rola-bosta surgem como um grupo ideal para estudar os impactos das perturbações humanas devido à sua sensibilidade a mudanças na heterogeneidade da paisagem (GARDNER et al., 2008; FUZESSY et al., 2021).

As plantações de espécies não nativas, como o eucalipto (*Eucalyptus* spp.), afetam os besouros rola-bosta ao modificar a disponibilidade de recursos tróficos, a umidade do solo e a cobertura vegetal, fatores determinantes para sua distribuição e (BRAGA et al., 2013; BEIROZ et al., 2017). Como consequência, as comunidades de besouros em paisagens transformadas tendem a apresentar uma redução na riqueza de espécies e um aumento na dominância de espécies generalistas, refletindo uma perda de diversidade funcional (MARTELLO et al., 2024). Nesse contexto, os besouros rola-bosta, como modelos de estudo, permitem compreender como a substituição da floresta nativa por plantações florestais exóticas impacta a biodiversidade,

fornecendo informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias de conservação e manejo sustentável da paisagem (LOUZADA et al., 2010).

1.2.3. Cenários de simulação como ferramenta de análises

Os modelos computacionais de simulação permitem recriar e analisar diferentes cenários hipotéticos com base em dados reais ou projetados. Na ecologia e conservação, esses modelos são ferramentas valiosas, pois possibilitam a avaliação dos efeitos de diversas intervenções humanas sobre os ecossistemas sem a necessidade de realizar experimentos em larga escala, que podem ser caros ou inviáveis (DEANGELIS et al., 2021). Dentro dessa abordagem, a modelagem do uso da terra é fundamental para compreender como os padrões da paisagem evoluem no tempo e no espaço. Esse método fornece uma maneira eficaz e replicável de estudar a relação entre o uso da terra, as decisões humanas e as mudanças no ambiente natural (VERBURG et al., 2019). Avaliar essas dinâmicas permite uma melhor compreensão das consequências ambientais da transformação da paisagem e de seus impactos nos ecossistemas (LIU et al., 2017).

Uma das principais vantagens da modelagem em relação às abordagens empíricas é sua capacidade de simular e comparar múltiplos cenários sem a necessidade de realizar experimentos no mundo real. Ao estabelecer diferentes condições e suposições dentro de um modelo, é possível realizar "experimentos virtuais" que permitem prever resultados e compreender os mecanismos subjacentes aos padrões observados. Isso facilita a análise de diversos fatores sem incorrer nos custos, no tempo e nos possíveis impactos negativos associados a experimentos em ambientes reais (ZAKHAROVA; MEYER; SEIFAN, 2019). No caso dos insetos, os modelos de simulação podem desempenhar um papel fundamental no estudo de sua diversidade e distribuição em paisagens heterogêneas (KRISTENSEN; DE BARRO; SCHELLHORN, 2013). Como os insetos respondem de maneira diferenciada às mudanças na estrutura da paisagem, esses modelos permitem avaliar como a heterogeneidade do habitat influencia a composição e a dinâmica das comunidades de insetos (GRIMMETT; WHITSED; HORTA, 2021). Além disso, podem ser utilizados para prever estratégias de manejo sustentável das florestas em cenários de mudança global (TESTOLIN et al., 2023).

Nesse contexto, ferramentas como a desenvolvida por HILÁRIO et al., (2025) permitem avaliar as mudanças na biodiversidade sob diferentes cenários de transformação da paisagem. A aplicação desse tipo de ferramenta demonstra sua utilidade para compreender como a diversidade biológica responde à configuração da paisagem, podendo ser estendida à análise de comunidades de insetos em ambientes fragmentados ou submetidos a mudanças no uso da terra.

Assim, essas simulações oferecem um arcabouço robusto para o planejamento da paisagem e a conservação da biodiversidade em ecossistemas em transformação.

No entanto, é importante destacar que não existe um único método para modelar cenários de biodiversidade em paisagens transformadas. A escolha de uma metodologia depende de múltiplos fatores, como a disponibilidade de dados, os objetivos do estudo e as perguntas de pesquisa (GUISAN; ZIMMERMANN, 2000). Algumas abordagens são baseadas em modelos mecanicistas, enquanto outras utilizam métodos estatísticos ou simulações estocásticas (DORMANN et al., 2013). Além disso, diferentes níveis de resolução espacial e temporal podem influenciar os resultados e sua aplicabilidade à gestão da paisagem (SCHRÖDER; SEPPELT, 2006; TURNER; GARDNER, 2015). Por isso, é fundamental selecionar a ferramenta mais adequada para cada contexto, garantindo que as simulações representem da melhor forma possível a complexidade dos ecossistemas estudados.

2. REFERÊNCIAS

- BEIROZ, W.; SAYER, E.; SLADE, E. M.; AUDINO, L.; BRAGA, R. F.; LOUZADA, J.; BARLOW, J. Spatial and temporal shifts in functional and taxonomic diversity of dung beetles in a human-modified tropical forest landscape. *Ecological Indicators*, v. 95, p. 518–526, dez. 2018. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.07.062.
- BEIROZ, W.; SLADE, E. M.; BARLOW, J.; SILVEIRA, J. M.; LOUZADA, J.; SAYER, E. Dung beetle community dynamics in undisturbed tropical forests: implications for ecological evaluations of land-use change. *Insect Conservation and Diversity*, v. 10, n. 1, p. 94–106, 12 jan. 2017. doi: 10.1111/icad.12206.
- BRAGA, R. F.; KORASAKI, V.; ANDRESEN, E.; LOUZADA, J. Dung Beetle Community and Functions along a Habitat-Disturbance Gradient in the Amazon: A Rapid Assessment of Ecological Functions Associated to Biodiversity. *PLoS ONE*, v. 8, n. 2, p. e57786, 27 fev. 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0057786.
- BROCKERHOFF, E. G.; JACTEL, H.; PARROTTA, J. A.; FERRAZ, S. F. B. Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. *Forest Ecology and Management*, v. 301, p. 43–50, 1 ago. 2013. doi: 10.1016/j.foreco.2012.09.018.
- BRONDÍZIO, E. Sonnewend.; SETTELE, Josef.; DÍAZ, Sandra.; NGO, H. Thu. The global assessment report of the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. [s.l.] Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), 2019.
- CHEN, Q.; FU, R.; CHENG, S.; QIAO, D.; HU, Z.; ZHANG, Z.; DAI, L. Effects of the conversion of natural tropical rainforest to monoculture rubber plantations on soil hydrological processes. *Journal of Plant Ecology*, v. 17, n. 2, 1 abr. 2024. doi: 10.1093/jpe/rtac021.

- DAMBROS, C. S.; JUNQUEIRA IZZO, T.; CASTUERA DE OLIVEIRA, L.; EDUARDO VICENTE, R.; PERES, C. A. Beta-diversity buffers fragmented landscapes against local species losses. *Oikos*, v. 2024, n. 3, 24 mar. 2024. doi: 10.1111/oik.10401.
- DEANGELIS, D. L.; FRANCO, D.; HASTINGS, A.; HILKER, F. M.; LENHART, S.; LUTSCHER, F.; PETROVSKAYA, N.; PETROVSKII, S.; TYSON, R. C. Towards Building a Sustainable Future: Positioning Ecological Modelling for Impact in Ecosystems Management. *Bulletin of Mathematical Biology*, v. 83, n. 10, p. 107, 4 out. 2021. doi: 10.1007/s11538-021-00927-y.
- DORMANN, C. F.; ELITH, J.; BACHER, S.; BUCHMANN, C.; CARL, G.; CARRE, G.; MARQUÉZ, J. R. G.; GRUBER, B.; LAFOURCADE, B.; LEITÃO, P. J.; MÜNKEMÜLLER, T.; MCCLEAN, C.; OSBORNE, P. E.; REINEKING, B.; SCHRÖDER, B.; SKIDMORE, A. K.; ZURELL, D.; LAUTENBACH, S. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, v. 36, n. 1, p. 27–46, 18 jan. 2013. doi: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x.
- FAO. 2021. *Evaluacion de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal*. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- FAHRIG, L.; BAUDRY, J.; BROTONS, L.; BUREL, F. G.; CRIST, T. O.; FULLER, R. J.; SIRAMI, C.; SIRIWARDENA, G. M.; MARTIN, J. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology Letters*, v. 14, n. 2, p. 101–112, 18 fev. 2011. doi: 10.1111/j.1461-0248.2010.01559.x.
- FELIPE-LUCIA, M. R.; SOLIVERES, S.; PENONE, C.; FISCHER, M.; AMMER, C.; BOCH, S.; BOEDDINGHAUS, R. S.; BONKOWSKI, M.; BUSCOT, F.; FIORE-DONNO, A. M.; FRANK, K.; GOLDMANN, K.; GOSSNER, M. M.; HÖLZEL, N.; JOCHUM, M.; KANDELER, E.; KLAUS, V. H.; KLEINEBECKER, T.; LEIMER, S.; MANNING, P.; OELMANN, Y.; SAIZ, H.; SCHALL, P.; SCHLOTER, M.; SCHÖNING, I.; SCHRUMPF, M.; SOLLY, E. F.; STEMPFHUBER, B.; WEISSER, W. W.; WILCKE, W.; WUBET, T.; ALLAN, E. Land-use intensity alters networks between biodiversity, ecosystem functions, and services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 117, n. 45, p. 28140–28149, 10 nov. 2020. doi: 10.1073/pnas.2016210117.
- FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; STUART CHAPIN, F.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; COLIN PRENTICE, I.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global Consequences of Land Use. [s.l: s.n.].
- FUZESSY, L. F.; BENÍTEZ-LÓPEZ, A.; SLADE, E. M.; BUFALO, F. S.; MAGRO-DE-SOUZA, G. C.; PEREIRA, L. A.; CULOT, L. Identifying the anthropogenic drivers of declines in tropical dung beetle communities and functions. *Biological Conservation*, v. 256, p. 109063, abr. 2021. doi: 10.1016/j.biocon.2021.109063.
- GARDNER, T. A.; HERNÁNDEZ, M. I. M.; BARLOW, J.; PERES, C. A. Understanding the biodiversity consequences of habitat change: the value of secondary and plantation forests for neotropical dung beetles. *Journal of Applied Ecology*, v. 45, n. 3, p. 883–893, 11 jun. 2008. doi: 10.1111/j.1365-2664.2008.01454.x.
- GRIMMETT, L.; WHITSED, R.; HORTA, A. Creating virtual species to test species distribution models: the importance of landscape structure, dispersal and population processes. *Ecography*, v. 44, n. 5, p. 753–765, 10 maio 2021. doi: 10.1111/ecog.05555.
- GUISAN, A.; ZIMMERMANN, N. E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, v. 135, n. 2–3, p. 147–186, dez. 2000. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00354-9.
- HALLAJ, Z.; BIJANI, M.; KARAMIDEHKORDI, E.; YOUSEFPOUR, R.; YOUSEFZADEH, H. Forest land use change effects on biodiversity ecosystem services and human well-being: A

- systematic analysis. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 23, p. 100445, set. 2024. doi: 10.1016/j.indic.2024.100445.
- HARTLEY, M. J. Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests. *Forest Ecology and Management*, v. 155, n. 1–3, p. 81–95, jan. 2002. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00549-7.
- HASAN, S. S.; ZHEN, L.; MIAH, Md. G.; AHAMED, T.; SAMIE, A. Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development*, v. 34, p. 100527, jun. 2020. doi: 10.1016/j.envdev.2020.100527.
- HILÁRIO, R. R.; CARVALHO, W. D.; XAVIER, B. D. S.; PALMEIRIM, J. M.; VIEIRA, M. V.; MUSTIN, K.; CARDOSO, P. A new tool to quantify biodiversity change under landscape transformation. *Ecological Applications*, v. 35, n. 1, 5 jan. 2025. doi: 10.1002/eap.3071.
- ISBELL, F.; GONZALEZ, A.; LOREAU, M.; COWLES, J.; DÍAZ, S.; HECTOR, A.; MACE, G. M.; WARDLE, D. A.; O'CONNOR, M. I.; DUFFY, J. E.; TURNBULL, L. A.; THOMPSON, P. L.; LARIGAUDERIE, A. Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales. *Nature*, v. 546, n. 7656, p. 65–72, 1 jun. 2017. doi: 10.1038/nature22899.
- KRISTENSEN, N. P.; DE BARRO, P. J.; SCHELLHORN, N. A. The Initial Dispersal and Spread of an Intentional Invader at Three Spatial Scales. *PLoS ONE*, v. 8, n. 5, p. e62407, 6 maio 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0062407.
- LINDENMAYER, D. Interactions between Forest Resource Management and Landscape Structure. *Current Landscape Ecology Reports*, v. 1, n. 1, p. 10–18, 30 mar. 2016. doi: 10.1007/s40823-016-0002-0.
- LIU, J.; LI, J.; QIN, K.; ZHOU, Z.; YANG, X.; LI, T. Changes in land-uses and ecosystem services under multi-scenarios simulation. *Science of The Total Environment*, v. 586, p. 522–526, maio 2017. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.005.
- LÓPEZ-BEDOYA, P. A.; MAGURA, T.; EDWARDS, F. A.; EDWARDS, D. P.; REY-BENAYAS, J. M.; LÖVEI, G. L.; NORIEGA, J. A. What level of native beetle diversity can be supported by forestry plantations? A global synthesis. *Insect Conservation and Diversity*, v. 14, n. 6, p. 736–747, 22 nov. 2021. doi: 10.1111/icad.12518.
- LOUZADA, J.; LIMA, A. P.; MATAVELLI, R.; ZAMBALDI, L.; BARLOW, J. Community structure of dung beetles in Amazonian savannas: role of fire disturbance, vegetation and landscape structure. *Landscape Ecology*, v. 25, n. 4, p. 631–641, 26 abr. 2010. doi: 10.1007/s10980-010-9448-3.
- LUNDHOLM, J. T. Plant species diversity and environmental heterogeneity: spatial scale and competing hypotheses. [s.l.: s.n.].
- MARTELLO, F.; DÁTTILO, W.; SOUZA-CAMPANA, D. R.; MEDEIROS, H. R.; SILVA, R. R.; RIBEIRO, M. C.; MORINI, M. S. C. Eucalyptus plantation reduces diversity and disrupts predator-prey correlations of soil invertebrates within Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, v. 553, p. 121592, fev. 2024a. doi: 10.1016/j.foreco.2023.121592.
- MENÉNDEZ, R.; MONTEITH, G. B.; VAN OOSTERZEE, P.; PREECE, N. D. Identifying the best method for restoring dung beetle biodiversity and function in the early stages of rainforest restoration. *Restoration Ecology*, v. 32, n. 4, 11 maio 2024. doi: 10.1111/rec.14104.
- NEWBOLD, T.; HUDSON, L. N.; HILL, S. L. L.; CONTU, S.; LYSENKO, I.; SENIOR, R. A.; BÖRGER, L.; BENNETT, D. J.; CHOIMES, A.; COLLEN, B.; DAY, J.; DE PALMA, A.; DÍAZ, S.; ECHEVERRÍA-LONDOÑO, S.; EDGAR, M. J.; FELDMAN, A.; GARON, M.; HARRISON, M. L. K.; ALHUSSEINI, T.; INGRAM, D. J.; ITESCU, Y.; KATTGE, J.; KEMP, V.; KIRKPATRICK, L.; KLEYER, M.; CORREIA, D. L. P.; MARTIN, C. D.; MEIRI, S.; NOVOSOLOV, M.; PAN, Y.; PHILLIPS, H. R. P.; PURVES, D. W.; ROBINSON, A.;

- SIMPSON, J.; TUCK, S. L.; WEIHER, E.; WHITE, H. J.; EWERS, R. M.; MACE, G. M.; SCHARLEMANN, J. P. W.; PURVIS, A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, v. 520, n. 7545, p. 45–50, 2 abr. 2015. doi: 10.1038/nature14324.
- NICHOLS, E.; LARSEN, T.; SPECTOR, S.; DAVIS, A. L.; ESCOBAR, F.; FAVILA, M.; VULINEC, K. Global dung beetle response to tropical forest modification and fragmentation: A quantitative literature review and meta-analysis. *Biological Conservation*, v. 137, n. 1, p. 1–19, jun. 2007. doi: 10.1016/j.biocon.2007.01.023.
- PRIYADARSHANA, T. S.; MARTIN, E. A.; SIRAMI, C.; WOODCOCK, B. A.; GOODALE, E.; MARTÍNEZ-NÚÑEZ, C.; LEE, M.; PAGANI-NÚÑEZ, E.; RADERSCHALL, C. A.; BROTONS, L.; REGE, A.; OUIN, A.; TSCHARNTKE, T.; SLADE, E. M. Crop and landscape heterogeneity increase biodiversity in agricultural landscapes: A global review and meta-analysis. *Ecology Letters*, v. 27, n. 3, 28 mar. 2024a. doi: 10.1111/ele.14412.
- REGOLIN, A. L.; RIBEIRO, M. C.; MARTELLO, F.; MELO, G. L.; SPONCHIADO, J.; CAMPANHA, L. F. de C.; SUGAI, L. S. M.; SILVA, T. S. F.; CÁCERES, N. C. Spatial heterogeneity and habitat configuration overcome habitat composition influences on alpha and beta mammal diversity. *Biotropica*, v. 52, n. 5, p. 969–980, 11 set. 2020. doi: 10.1111/btp.12800.
- SCHRÖDER, B.; SEPPELT, R. Analysis of pattern–process interactions based on landscape models—Overview, general concepts, and methodological issues. *Ecological Modelling*, v. 199, n. 4, p. 505–516, dez. 2006. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.05.036.
- SEMENCHUK, P.; PLUTZAR, C.; KASTNER, T.; MATEJ, S.; BIDOGLIO, G.; ERB, K.-H.; ESSL, F.; HABERL, H.; WESSELY, J.; KRAUSMANN, F.; DULLINGER, S. Relative effects of land conversion and land-use intensity on terrestrial vertebrate diversity. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, p. 615, 1 fev. 2022. doi: 10.1038/s41467-022-28245-4.
- STEIN, A.; GERSTNER, K.; KREFT, H. Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales *Ecology Letters* Blackwell Publishing Ltd, , 2014. . doi: 10.1111/ele.12277.
- TAVARES, A.; BEIROZ, W.; FIALHO, A.; FRAZÃO, F.; MACEDO, R.; LOUZADA, J.; AUDINO, L. Eucalyptus plantations as hybrid ecosystems: Implications for species conservation in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, v. 433, p. 131–139, fev. 2019. doi: 10.1016/j.foreco.2018.10.063.
- TESTOLIN, R.; DALMONECH, D.; MARANO, G.; BAGNARA, M.; D’ANDREA, E.; MATTEUCCI, G.; NOCE, S.; COLLALTI, A. Simulating diverse forest management options in a changing climate on a *Pinus nigra* subsp. *laricio* plantation in Southern Italy. *Science of The Total Environment*, v. 857, p. 159361, jan. 2023. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159361.
- TEWS, J.; BROSE, U.; GRIMM, V.; TIELBÖRGER, K.; WICHMANN, M. C.; SCHWAGER, M.; JELTSCH, F. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: The importance of keystone structures *Journal of Biogeography* Blackwell Publishing Ltd, , 2004. . doi: 10.1046/j.0305-0270.2003.00994.x.
- TONETTI, V.; PENA, J. C.; SCARPELLI, M. DA; SUGAI, L. S.; BARROS, F. M.; ANUNCIAÇÃO, P. R.; SANTOS, P. M.; TAVARES, A. L.; RIBEIRO, M. C. Landscape heterogeneity: concepts, quantification, challenges and future perspectives. *Environmental Conservation*, v. 50, n. 2, p. 83–92, 27 jun. 2023. doi: 10.1017/S0376892923000097.
- TURNER, M. G.; GARDNER, R. H. *Landscape Ecology in Theory and Practice*. New York, NY: Springer New York, 2015.
- VERBURG, P. H.; ALEXANDER, P.; EVANS, T.; MAGLIOCCA, N. R.; MALEK, Z.; ROUNSEVELL, M. DA; VAN VLIET, J. Beyond land cover change: towards a new

generation of land use models. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 38, p. 77–85, jun. 2019. doi: 10.1016/j.cosust.2019.05.002.

WANG, X.; HUA, F.; WANG, L.; WILCOVE, D. S.; YU, D. W. The biodiversity benefit of native forests and mixed-species plantations over monoculture plantations. *Diversity and Distributions*, v. 25, n. 11, p. 1721–1735, 28 nov. 2019. doi: 10.1111/ddi.12972.

ZAKHAROVA, L.; MEYER, K. M.; SEIFAN, M. Trait-based modelling in ecology: A review of two decades of research. *Ecological Modelling*, v. 407, p. 108703, set. 2019. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2019.05.008.

3. PARTE II

3.1. INTRODUÇÃO GERAL

As atividades humanas, especialmente a conversão e a expansão do uso da terra, são impulsionadas principalmente pela agricultura, silvicultura e desenvolvimento urbano (CURTIS et al., 2018; BOWLER et al., 2020). Essas atividades transformaram as paisagens naturais ao redor do planeta, resultando em alterações significativas na biodiversidade global (FOLEY et al., 2005; NEWBOLD et al., 2015). Como consequência têm-se gerado um mosaico de habitats que, embora em muitos casos simplifique os ecossistemas e leve à homogeneização biológica (VALLEJOS; PADIAL; VITULE, 2016), também podem contribuir com a criação de padrões de heterogeneidade espacial envolvendo os usos antrópicos da terra e a variabilidade original da região, criando paisagens complexas e variegadas (KORASAKI et al., 2013; PRIYADARSHANA et al., 2024b). Nesse contexto, a heterogeneidade da paisagem, ou seja, a variabilidade espacial dos tipos de uso e ocupação natural do solo, pode desempenhar um papel na conservação da biodiversidade. Por exemplo, áreas agrícolas que mantêm certo grau de vegetação natural podem sustentar um certo nível de diversidade em paisagens agrícolas (FAHRIG et al., 2011).

A heterogeneidade da paisagem tem sido amplamente estudada na ecologia por meio de hipóteses tais como a de “heterogeneidade do habitat” (MACARTHUR; MACARTHUR, 1961; TEWS et al., 2004; STEIN; GERSTNER; KREFT, 2014)), que propõe que ambientes mais complexos oferecem uma maior diversidade de nichos, permitindo a coexistência de um número maior de espécies. No entanto, evidências empíricas indicam que as relações entre heterogeneidade espacial e a diversidade de espécies podem ser mais complexas do que inicialmente proposto (HEIDRICH et al., 2020). Em certos casos, a diversidade pode até

diminuir em paisagens excessivamente heterogêneas, dependendo do grupo taxonômico, dos parâmetros estruturais da vegetação e da escala espacial considerada (WILSON et al., 2017; LOKE; CHISHOLM, 2022; HEIDRICH et al., 2023). Contribuição importante es abordagem prática do retorno

Em se tratando de heterogeneidade e uso da terra em escalas espaciais, os plantios florestais introduzidos (como *Eucalyptus* spp., palma, seringueira e teca) podem alterar menos a estrutura vertical da vegetação em comparação com cultivos de espécies não arbóreas (soja, pastagens, milho etc.). No entanto, esses monocultivos, projetados principalmente para maximizar a produção de produtos madeireiros e não-madeireiros com fins comerciais, frequentemente resultam em redução da biodiversidade. No entanto, esses monocultivos, frequentemente resultam em redução da biodiversidade, tornando-se assim, em um exemplo concreto, e controverso, de sistemas que modificam a diversidade dentro da paisagem (BARLOW et al., 2007; FELTON et al., 2010; TAVARES et al., 2019; WANG et al., 2019; LÓPEZ-BEDOYA et al., 2021; MARTELLO et al., 2024b) Isso é especialmente relevante no Sul Global, onde (1) há a maior proporção de plantações florestais, predominantemente compostas por espécies exóticas (FAO, 2021), e (2) essas plantações estão inseridas em algumas das regiões mais biodiversas do mundo.

Nesse contexto, os plantios de árvores exóticas, considerados como uma forma de perturbação, podem introduzir heterogeneidade na paisagem que difere da presente naturalmente, resultando em diferenças na composição de espécies de insetos entre as áreas de plantio e a floresta primária (PAWSON, 2006; TABOADA et al., 2010; DEÁK et al., 2021). No entanto, a discrepância entre a interação dos elementos natural e introduzido na composição da diversidade limita nossa capacidade de generalizar sobre o papel das plantações florestais exóticas para a biodiversidade, especialmente em um contexto de introdução de ecossistemas híbridas e/ou “novel ecosystems” (TAVARES et al., 2019).

Reconhece-se que embora a biodiversidade seja reduzida até certo grau pela simplificação de habitat provocada pelos plantios florestais homogêneos, e, embora os plantios de espécies exóticas possam abrigar comunidades que diferem das espécies presentes na floresta primária (MARTELLO et al., 2024b), a perda de espécies dependerá principalmente (1) do contexto espacial e temporal (BEIROZ et al., 2017), (2) do grupo taxonômico em foco (FIERRO et al., 2017; CASTAÑO-VILLA et al., 2019; TAVARES et al., 2019; IEZZI; DE ANGELO; DI BITETTI, 2020), e (3) dos ecossistemas de referência utilizados para realizar as

comparações ou como referência (BROCKERHOFF et al., 2013; BRAUN et al., 2017; LÓPEZ-BEDOYA et al., 2021).

Os insetos, que desempenham papéis ecológicos fundamentais, podem ser especialmente impactados por esses plantios florestais extensivos, afetando diferentes grupos taxonômicos (DUFFUS et al., 2023). Os escarabeíneos são considerados um grupo sensível às alterações ambientais provocadas pelas atividades humanas e provedores de serviços ambientais relevantes em sistemas tropicais (NICHOLS et al., 2007). Esses besouros, conhecidos como rola-bosta, são influenciados por diversos fatores, como a vegetação, o tipo de solo e as perturbações na estruturação das comunidades (LOUZADA et al., 2010; BRAGA et al., 2013; BEIROZ et al., 2017; GIMÉNEZ GÓMEZ et al., 2022). Nesse sentido, a introdução de plantações de eucalipto pode alterar significativamente a heterogeneidade do habitat biótico e abiótico desse grupo de insetos, criando condições distintas em relação às florestas naturais. Assim, compreender como as plantações exóticas influenciam a heterogeneidade da paisagem e, conseqüentemente, a biodiversidade local e regional, pode fornecer informações valiosas para orientar futuras políticas de manejo e conservação desse importante grupo de insetos.

Esta dissertação tem como objetivo geral avaliar como o aumento na proporção de áreas de florestas plantadas de eucalipto e naturais pode contribuir para a compreensão do papel da heterogeneidade espacial em comunidades de escarabeíneos em um contexto amazônico, utilizando simulações de cenários possíveis de substituição de habitat florestal por plantações. A dissertação é composta por duas partes: a primeira é uma introdução geral e a segunda apresenta os resultados desta pesquisa em forma de artigo científico, e se encontra formatado de acordo com as normas da revista *Forest Ecology and Management*.

3.2. REFERÊNCIAS

- BARLOW, J.; GARDNER, T. A.; ARAUJO, I. S.; ÁVILA-PIRES, T. C.; BONALDO, A. B.; COSTA, J. E.; ESPOSITO, M. C.; FERREIRA, L. V.; HAWES, J.; HERNANDEZ, M. I. M.; HOOGMOED, M. S.; LEITE, R. N.; LO-MAN-HUNG, N. F.; MALCOLM, J. R.; MARTINS, M. B.; MESTRE, L. A. M.; MIRANDA-SANTOS, R.; NUNES-GUTJAHR, A. L.; OVERAL, W. L.; PARRY, L.; PETERS, S. L.; RIBEIRO-JUNIOR, M. A.; DA SILVA, M. N. F.; DA SILVA MOTTA, C.; PERES, C. A. Quantifying the biodiversity value of tropical primary, secondary, and plantation forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 104, n. 47, p. 18555–18560, 20 nov. 2007. doi: 10.1073/pnas.0703333104.
- BEIROZ, W.; SLADE, E. M.; BARLOW, J.; SILVEIRA, J. M.; LOUZADA, J.; SAYER, E. Dung beetle community dynamics in undisturbed tropical forests: implications for ecological evaluations of land-use change. *Insect Conservation and Diversity*, v. 10, n. 1, p. 94–106, 12 jan. 2017. doi: 10.1111/icad.12206.

- BOWLER, D. E.; BJORKMAN, A. D.; DORNELAS, M.; MYERS-SMITH, I. H.; NAVARRO, L. M.; NIAMIR, A.; SUPP, S. R.; WALDOCK, C.; WINTER, M.; VELLEND, M.; BLOWES, S. A.; BÖHNING-GAESE, K.; BRUELHEIDE, H.; ELAHI, R.; ANTÃO, L. H.; HINES, J.; ISBELL, F.; JONES, H. P.; MAGURRAN, A. E.; CABRAL, J. S.; BATES, A. E. Mapping human pressures on biodiversity across the planet uncovers anthropogenic threat complexes. *People and Nature*, v. 2, n. 2, p. 380–394, 1 jun. 2020. doi: 10.1002/pan3.10071.
- BRAGA, R. F.; KORASAKI, V.; ANDRESEN, E.; LOUZADA, J. Dung Beetle Community and Functions along a Habitat-Disturbance Gradient in the Amazon: A Rapid Assessment of Ecological Functions Associated to Biodiversity. *PLoS ONE*, v. 8, n. 2, p. e57786, 27 fev. 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0057786.
- BRAUN, A. Ch.; TROEGER, D.; GARCIA, R.; AGUAYO, M.; BARRA, R.; VOGT, J. Assessing the impact of plantation forestry on plant biodiversity. *Global Ecology and Conservation*, v. 10, p. 159–172, abr. 2017. doi: 10.1016/j.gecco.2017.03.006.
- BROCKERHOFF, E. G.; JACTEL, H.; PARROTTA, J. A.; FERRAZ, S. F. B. Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. *Forest Ecology and Management*, v. 301, p. 43–50, 1 ago. 2013. doi: 10.1016/j.foreco.2012.09.018.
- CASTAÑO-VILLA, G. J.; ESTEVEZ, J. V.; GUEVARA, G.; BOHADA-MURILLO, M.; FONTÚRBEL, F. E. Differential effects of forestry plantations on bird diversity: A global assessment. *Forest Ecology and Management*, v. 440, p. 202–207, maio 2019. doi: 10.1016/j.foreco.2019.03.025.
- CURTIS, P. G.; SLAY, C. M.; HARRIS, N. L.; TYUKAVINA, A.; HANSEN, M. C. Classifying drivers of global forest loss. *Science*, v. 361, n. 6407, p. 1108–1111, 14 set. 2018. doi: 10.1126/science.aau3445.
- DEÁK, B.; KOVÁCS, B.; RÁDAI, Z.; APOSTOLOVA, I.; KELEMEN, A.; KISS, R.; LUKÁCS, K.; PALPURINA, S.; SOPOTLIEVA, D.; BÁTHORI, F.; VALKÓ, O. Linking environmental heterogeneity and plant diversity: The ecological role of small natural features in homogeneous landscapes. *Science of The Total Environment*, v. 763, p. 144199, abr. 2021. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144199.
- DUFFUS, N. E.; ECHEVERRI, A.; DEMPEWOLF, L.; NORIEGA, J. A.; FURUMO, P. R.; MORIMOTO, J. The Present and Future of Insect Biodiversity Conservation in the Neotropics: Policy Gaps and Recommendations. *Neotropical Entomology* Springer, , 1 jun. 2023. . doi: 10.1007/s13744-023-01031-7.
- FAO. 2021. *Evaluacion de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal*. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- FELTON, A.; KNIGHT, E.; WOOD, J.; ZAMMIT, C.; LINDENMAYER, D. A meta-analysis of fauna and flora species richness and abundance in plantations and pasture lands. *Biological Conservation*, v. 143, n. 3, p. 545–554, mar. 2010. doi: 10.1016/j.biocon.2009.11.030.
- FIERRO, A.; GREZ, A. A.; VERGARA, P. M.; RAMÍREZ-HERNÁNDEZ, A.; MICÓ, E. How does the replacement of native forest by exotic forest plantations affect the diversity, abundance and trophic structure of saproxylic beetle assemblages? *Forest Ecology and Management*, v. 405, p. 246–256, dez. 2017. doi: 10.1016/j.foreco.2017.09.026.
- FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; STUART CHAPIN, F.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; COLIN PRENTICE, I.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global Consequences of Land Use. [s.l: s.n.].

- GIMÉNEZ GÓMEZ, V. C.; VERDÚ, J. R.; CASANOVES, F.; ZURITA, G. A. Functional responses to anthropogenic disturbance and the importance of selected traits: A study case using dung beetles. *Ecological Entomology*, v. 47, n. 4, p. 503–514, 14 ago. 2022. doi: 10.1111/een.13135.
- HEIDRICH, L.; BAE, S.; LEVICK, S.; SEIBOLD, S.; WEISSER, W.; KRZYTEK, P.; MAGDON, P.; NAUSS, T.; SCHALL, P.; SEREBRYANYK, A.; WÖLLAUER, S.; AMMER, C.; BÄSSLER, C.; DOERFLER, I.; FISCHER, M.; GOSSNER, M. M.; HEURICH, M.; HOTHORN, T.; JUNG, K.; KREFT, H.; SCHULZE, E.-D.; SIMONS, N.; THORN, S.; MÜLLER, J. Heterogeneity–diversity relationships differ between and within trophic levels in temperate forests. *Nature Ecology & Evolution*, v. 4, n. 9, p. 1204–1212, 13 jul. 2020. doi: 10.1038/s41559-020-1245-z.
- HEIDRICH, L.; BRANDL, R.; AMMER, C.; BAE, S.; BÄSSLER, C.; DOERFLER, I.; FISCHER, M.; GOSSNER, M. M.; HEURICH, M.; HEIBL, C.; JUNG, K.; KRZYTEK, P.; LEVICK, S.; MAGDON, P.; SCHALL, P.; SCHULZE, E.-D.; SEIBOLD, S.; SIMONS, N. K.; THORN, S.; WEISSER, W. W.; WÖLLAUER, S.; MÜLLER, J. Effects of heterogeneity on the ecological diversity and redundancy of forest fauna. *Basic and Applied Ecology*, v. 73, p. 72–79, dez. 2023. doi: 10.1016/j.baae.2023.10.005.
- IEZZI, M. E.; DE ANGELO, C.; DI BITETTI, M. S. Tree plantations replacing natural grasslands in high biodiversity areas: How do they affect the mammal assemblage? *Forest Ecology and Management*, v. 473, p. 118303, out. 2020. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118303.
- KORASAKI, V.; BRAGA, R. F.; ZANETTI, R.; MOREIRA, F. M. S.; VAZ-DE-MELLO, F. Z.; LOUZADA, J. Conservation value of alternative land-use systems for dung beetles in Amazon: valuing traditional farming practices. *Biodiversity and Conservation*, v. 22, n. 6–7, p. 1485–1499, 30 jun. 2013. doi: 10.1007/s10531-013-0487-3.
- LOKE, L. H. L.; CHISHOLM, R. A. Measuring habitat complexity and spatial heterogeneity in ecology. *Ecology Letters*, v. 25, n. 10, p. 2269–2288, 1 out. 2022. doi: 10.1111/ele.14084.
- LÓPEZ-BEDOYA, P. A.; MAGURA, T.; EDWARDS, F. A.; EDWARDS, D. P.; REY-BENAYAS, J. M.; LÖVEI, G. L.; NORIEGA, J. A. What level of native beetle diversity can be supported by forestry plantations? A global synthesis. *Insect Conservation and Diversity*, v. 14, n. 6, p. 736–747, 22 nov. 2021. doi: 10.1111/icad.12518.
- LOUZADA, J.; LIMA, A. P.; MATAVELLI, R.; ZAMBALDI, L.; BARLOW, J. Community structure of dung beetles in Amazonian savannas: role of fire disturbance, vegetation and landscape structure. *Landscape Ecology*, v. 25, n. 4, p. 631–641, 26 abr. 2010. doi: 10.1007/s10980-010-9448-3.
- MACARTHUR, R. H.; MACARTHUR, J. W. On Bird Species Diversity. *Source: Ecology*. [s.l.: s.n.].
- MARTELLO, F.; DÁTTILO, W.; SOUZA-CAMPANA, D. R.; MEDEIROS, H. R.; SILVA, R. R.; RIBEIRO, M. C.; MORINI, M. S. C. Eucalyptus plantation reduces diversity and disrupts predator-prey correlations of soil invertebrates within Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, v. 553, p. 121592, fev. 2024. doi: 10.1016/j.foreco.2023.121592.
- NEWBOLD, T.; HUDSON, L. N.; HILL, S. L. L.; CONTU, S.; LYSENKO, I.; SENIOR, R. A.; BÖRGER, L.; BENNETT, D. J.; CHOIMES, A.; COLLEN, B.; DAY, J.; DE PALMA, A.; DÍAZ, S.; ECHEVERRÍA-LONDOÑO, S.; EDGAR, M. J.; FELDMAN, A.; GARON, M.; HARRISON, M. L. K.; ALHUSSEINI, T.; INGRAM, D. J.; ITESCU, Y.; KATTGE, J.; KEMP, V.; KIRKPATRICK, L.; KLEYER, M.; CORREIA, D. L. P.; MARTIN, C. D.; MEIRI, S.; NOVOSOLOV, M.; PAN, Y.; PHILLIPS, H. R. P.; PURVES, D. W.; ROBINSON, A.; SIMPSON, J.; TUCK, S. L.; WEIHER, E.; WHITE, H. J.; EWERS, R. M.; MACE, G. M.; SCHARLEMANN, J. P. W.; PURVIS, A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, v. 520, n. 7545, p. 45–50, 2 abr. 2015. doi: 10.1038/nature14324.

- NICHOLS, E.; LARSEN, T.; SPECTOR, S.; DAVIS, A. L.; ESCOBAR, F.; FAVILA, M.; VULINEC, K. Global dung beetle response to tropical forest modification and fragmentation: A quantitative literature review and meta-analysis. *Biological Conservation*, v. 137, n. 1, p. 1–19, jun. 2007. doi: 10.1016/j.biocon.2007.01.023.
- PAWSON, S. M. Effects of landscape heterogeneity and clearfell harvest size on beetle (Coleoptera) biodiversity in plantation forests. [s.l.: s.n.].
- PRIYADARSHANA, T. S.; MARTIN, E. A.; SIRAMI, C.; WOODCOCK, B. A.; GOODALE, E.; MARTÍNEZ-NÚÑEZ, C.; LEE, M.; PAGANI-NÚÑEZ, E.; RADERSCHALL, C. A.; BROTONS, L.; REGE, A.; OUIN, A.; TSCHARNTKE, T.; SLADE, E. M. Crop and landscape heterogeneity increase biodiversity in agricultural landscapes: A global review and meta-analysis. *Ecology Letters*, v. 27, n. 3, 28 mar. 2024. doi: 10.1111/ele.14412.
- STEIN, A.; GERSTNER, K.; KREFT, H. Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales *Ecology Letters* Blackwell Publishing Ltd., 2014. . doi: 10.1111/ele.12277.
- TABOADA, Á.; TÁRREGA, R.; CALVO, L.; MARCOS, E.; MARCOS, J. A.; SALGADO, J. M. Plant and carabid beetle species diversity in relation to forest type and structural heterogeneity. *European Journal of Forest Research*, v. 129, n. 1, p. 31–45, 24 jan. 2010. doi: 10.1007/s10342-008-0245-3.
- TAVARES, A.; BEIROZ, W.; FIALHO, A.; FRAZÃO, F.; MACEDO, R.; LOUZADA, J.; AUDINO, L. Eucalyptus plantations as hybrid ecosystems: Implications for species conservation in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, v. 433, p. 131–139, fev. 2019. doi: 10.1016/j.foreco.2018.10.063.
- TEWS, J.; BROSE, U.; GRIMM, V.; TIELBÖRGER, K.; WICHMANN, M. C.; SCHWAGER, M.; JELTSCH, F. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: The importance of keystone structures *Journal of Biogeography* Blackwell Publishing Ltd, , 2004. . doi: 10.1046/j.0305-0270.2003.00994.x.
- VALLEJOS, M. A. V.; PADIAL, A. A.; VITULE, J. R. S. Human-induced landscape changes homogenize atlantic forest bird assemblages through nested species loss. *PLoS ONE*, v. 11, n. 2, 1 fev. 2016. doi: 10.1371/journal.pone.0147058.
- WANG, X.; HUA, F.; WANG, L.; WILCOVE, D. S.; YU, D. W. The biodiversity benefit of native forests and mixed-species plantations over monoculture plantations. *Diversity and Distributions*, v. 25, n. 11, p. 1721–1735, 28 nov. 2019. doi: 10.1111/ddi.12972.
- WILSON, S.; MITCHELL, G. W.; PASHER, J.; MCGOVERN, M.; HUDSON, M. A. R.; FAHRIG, L. Influence of crop type, heterogeneity and woody structure on avian biodiversity in agricultural landscapes. *Ecological Indicators*, v. 83, p. 218–226, 1 dez. 2017. doi: 10.1016/j.ecolind.2017.07.059.

4. PARTE III-ARTIGO

4.1 ARTIGO

*Formatado de acordo com o periódico “Forest Ecology and Management”

Título: Effects of simulated habitat replacement between native forests and *Eucalyptus* spp. plantations: A case study on dung beetle diversity in the Amazon

Cardozo-Rueda, A^{a, d*}, Wallace Beiroz^{b,c}, Julio Louzada^d

^a Programa de Pós-graduação em Entomologia, Departamento de Entomologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

^b Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Monitoramento Ambiental, Centro de Ciências Aplicadas e Educação, Departamento de Engenharia e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba, Rio Tinto, Paraíba, Brasil

^c Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Bahia, Brasil

^d Laboratório de ecologia e Conservação de Invertebrados, Setor de Ecologia, Departamento de Biologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil

*Corresponding author at: Programa de Pós-graduação em Entomologia, Departamento de Entomologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil

E-mail address: arnolcardozo98@gmail.com

Abstract

Human activities, particularly the expansion of monocultures, have a significant impact on tropical forests, leading to changes in biodiversity. Understanding how these changes affect diversity responses in mixed landscapes can help guide conservation efforts and strategies. Our hypothesis is that while the introduction of *Eucalyptus* plantations may introduce some variability into the habitat, an excessive proportion of these plantations could result in a decrease in diversity due to the homogeneity these monocultures create in the local habitat and landscape. To investigate this, we assessed the effects of simultaneous substitution between *Eucalyptus* plantations and primary forest sites on dung beetle (Coleoptera: Scarabaeinae) communities using simulated scenarios. We employed removal and replacement scenarios,

analyzing the proportion of disturbed sites (*Eucalyptus* plantations) relative to primary forest and vice versa. Our findings indicate that while the replacement of forests with *Eucalyptus* plantations suggests an increase in diversity at the regional and between-site levels, this increase is limited. As the proportion of *Eucalyptus* in the landscape rises, local losses of dung beetle diversity tend to be masked, which is reflected in a reduction of alpha diversity. Furthermore, at intermediate proportions of substitution, a similar number of species is maintained. It is important to consider local and regional dynamics in response to habitat changes to develop effective conservation strategies, especially in landscapes where exotic tree plantations coexist with natural forests.

Keywords: Forestry, tropical forests, dung beetles, mixed landscapes, biodiversity.

4.2. Introduction

The spatial arrangement of habitats in a landscape influences how species' interaction and the assemblage of communities (Fahrig et al., 2011; Beckman et al., 2019). Landscape heterogeneity (the variety of habitat types and variability within a region) is a key factor defining community responses at different spatial scales (Stein et al., 2014; Beiroz et al., 2019). However, these relationships are not always linear and can exhibit significant complexity. For instance, in landscapes with high heterogeneity, considerable variation in beta diversity (between communities) can lead to increased gamma (regional) diversity, even if alpha (local) diversity does not consistently remain high across all habitats. Yet, this pattern does not consistently hold across all contexts; high beta diversity may arise from species loss rather than substitution, resulting in elevated beta diversity alongside low gamma diversity (Marathe et al., 2021; Dambros et al., 2024).

The variability in landscape configuration depends on specific context, making it particularly relevant to explore how these concepts manifest in more complex settings, such as mixed landscapes where natural and introduced ecosystems coexist. Understanding how diversity responds to the interaction between naturally heterogeneous systems, like tropical forests, and the introduction of exotic forest species with lower structural complexity is crucial (Tavares et al., 2019). While these exotic species may contribute to landscape heterogeneity, their interaction with the natural ecosystem can differ considerably from patterns observed in other contexts (Heidrich et al., 2020, 2023). The structural complexity in mixed landscapes suggests that the responses of diversity metrics may be more nuanced and specific, raising new

questions and challenges in the study of biodiversity in tropical ecosystems. Particularly in mixed landscapes, where natural and introduced elements integrate, they present an underexplored scenario in terms of their impact on biodiversity.

To our knowledge, studies evaluating these resulting landscapes composed by historical and hybrid ecosystems or, in some cases, 'novel ecosystems', are limited (Hobbs et al., 2006; Svenning et al., 2024; Tavares et al., 2019). In the context of the expansion of monocultures and the intensive exploitation of forest resources in the Global South (FAO, 2020), these landscapes represent a unique scenario that poses significant threats to diversity, especially to forest integrity (López-Bedoya et al., 2021). The increasing substitution of natural habitats with non-native *Eucalyptus* spp. plantations creates a conducive context for investigating how interactions between natural ecosystems and introduced systems affect biodiversity. Groups like dung beetles, which are particularly sensitive to habitat disturbances (Beiroz et al., 2017; Solar et al., 2015; Louzada et al., 2010), can provide key insights into these impacts. As indicators of ecosystem health, studying the composition and structure of dung beetle communities in mixed landscapes will help us better understand how biodiversity is affected by these habitat alterations.

In this study, through scenarios of removal and replacement, we analyze how the proportion of disturbed sites (*Eucalyptus* plantations) and primary forest acts as a generator of spatial heterogeneity in the dung beetle community (Coleoptera: Scarabaeinae). We propose that the initial introduction of *Eucalyptus* plantations may contribute to landscape variability; however, an excessive proportion of these plantations may lead to a decrease in regional diversity and a local loss of species. From this central hypothesis, we derive the following questions: (1) How does the proportion of *Eucalyptus* plantations, compared to primary forest, influence local dung beetle diversity? (2) What patterns of beta and gamma diversity are observed in response to the substitution between *Eucalyptus* plantations and primary forest, and how do these patterns vary as the proportion of habitats changes? (3) How does the proportion of replacement of forest by *Eucalyptus*, or vice versa, influence alpha, beta and gamma diversity over time?

4.3. Material and Methods

We based our study on a dataset of dung beetles (Coleoptera: Scarabaeinae) collected by Beiroz et al. (2017) and the long-term ecological research program team in the Jari River

Basin. Covering a five-year period, these empirical data, obtained through standardized sampling, allow us to quantify multiple facets of biodiversity across different habitat proportions. Although our methodology involves simulated scenarios, it is grounded in field data, ensuring that our results reflect real ecological processes rather than purely theoretical assumptions (Hilario et al., 2024). By incorporating temporal and spatial dimensions, our approach accounts for natural variability in dung beetle communities, providing a robust framework for assessing biodiversity changes.

4.4. Study area

Sampling was conducted in an area of 1.7 million hectares (belonging to Forestal Jari Cellulose e Papel) in the Brazilian Amazon. This landscape, originally designated for the extraction of non-timber forest products and subsistence hunting (Barlow et al., 2010; Parry et al., 2007), is located on the border between the states of Pará and Amapá in northeastern Brazil (00°27'00"–01°30'00" S, 51°40'00"–53°20'00" W). Since the 1970s, anthropogenic transformations have progressively modified the landscape of the region, generating significant changes due to human activity, giving rise to an almost experimental landscape that combines primary forests with extensive plantations of *Eucalyptus* spp., interconnected by primary forest corridors. The region experiences a distinct wet season from January to June and a dry season from September to November. The average annual rainfall is 2,115 mm, while the average annual temperature is $26.7 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$.

4.5. Sampling protocol

We sampled dung beetles in continuous primary forest and *Eucalyptus* plantation sites at a meso-regional scale (see Beiroz et al., 2018). Dung beetle collections were conducted over five consecutive years (2009-2013) during the rainy season, ensuring temporal consistency in the sampling. At each site, Pitfall traps were employed for a period of 48 hours, baited with 30 g of pig and human feces and protected from rain using a plastic lid. Five traps were separated by 150 m each other were arranged along 600 m transects, placed at a minimum distance of 500 m from the nearest edge, in both native forest and plantation areas. The dung beetle samples were sorted, stored, and taxonomically identified using specific keys (Vaz de Mello et al., 2011),

the identification guide (*in prep.*) and the reference collection. The specimens were deposited in the collection of the Federal University of Lavras (CREN - UFLA).

4.6. Habitat replacement scenarios

We created simulated scenarios to examine changes in the dung beetle community between native forest and *Eucalyptus* plantation sites, using the RStudio console (RStudio team, 2024). We implemented a random resampling approach across 102 species of dung beetles, considering a total of 12 forest locations and 15 eucalyptus plantation sites as landscape units, for each year. Subsequently, we progressively replaced native forest sites by plantation sites, repeating this process through iterative loops one hundred times for each scenario and year. The same procedure was applied in the reverse direction; this approach was designed to capture potential changes in both directions of the beetle communities. Furthermore, the use of multiple iterations ensures that the results are not biased by a single replacement configuration.

Our methodology guarantees that the observed trends are representative, capturing the inherent variability associated with random substitution and providing robust estimates of diversity metrics (Figure 1). To eliminate the effect of sample size and facilitate a fair comparison, we standardized the number of sites between land covers (three *Eucalyptus* sites were randomly removed before replacement by a native forest). This approach helps to avoid biases associated with variability in spatial redistribution and ensures an equitable comparison between the different scenarios.

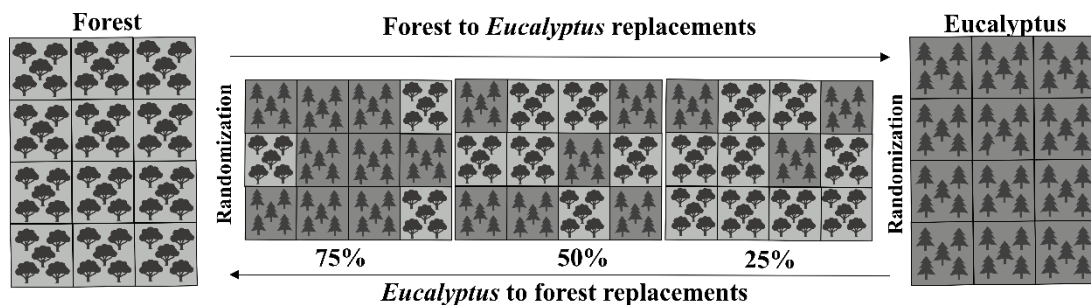


Figure 1. Schematic diagram based on substitution scenarios, illustrating our conceptual model and quantitative framework.

4.7. Data analysis

To quantify changes in the dung beetle community under different substitution scenarios, we assessed the mean local alpha diversity, gamma diversity, and mean abundance for each scenario, after excluding species that were not collected in each year. Alpha diversity was calculated as the mean species richness among sites, following each substitution scenario. Gamma diversity was determined as the total sum of species, and finally, mean abundance was evaluated as the average number of individuals from sites following each substitution scenario. Next, we quantified beta diversity responses using the Bray-Curtis index based on abundance to analyze overall changes in community structure (Schroeder & Jenkins, 2018). All analyses were conducted using R software, version 4.4.0 (R Development Core Team, 2024), employing the “vegan” package (Oksanen et al., 2024) for alpha diversity analysis and “betapart” for beta (Baselga et al., 2012). The results were graphically represented using the “ggplot2” package (Wickham, 2016).

We standardized the proportion of substitution by transforming all values into percentages ranging from 0 to 100, where 0% represents total absence of substitution and 100% indicates a scenario of complete habitat replacement. The percentage of substitution was calculated by dividing the number of substituted sites by the total number of sites and multiplying the result by 100. To facilitate the interpretation of these data, we utilized graphs that incorporate 95% confidence intervals and error bars. These graphs provide a more comprehensive representation of the precision and variability of our results, allowing for comparisons between substitution scenarios and an understanding of how metrics change with the percentage of substitution.

Finally, we calculated a regional baseline for beta diversity to provide a reference value for our comparisons. This baseline was calculated as the average beta diversity values from sites without substitutions, enabling us to evaluate changes in beta diversity relative to the substitution scenarios.

4.8. Results

4.8.1. Dung beetles' local richness and abundance

In all the examined years (2009–2013), we analyzed a total of 18,885 dung beetles from 102 species. The replacement of native forests with *Eucalyptus* plantations showed a notable decrease in both average species richness and dung beetle abundance. Conversely, the restoration of *Eucalyptus* sites to native forests increased both species richness and individual

abundance (Figures 2a and 2b). These patterns remained consistent over time, although there were minor fluctuations in annual responses. Furthermore, the error bars, which represent confidence intervals, exhibited limited variability in the results, thereby reinforcing the uniformity of these patterns over time.

We also observed a trend toward convergence when approximately 50% of the site had been replaced, where species richness and abundance tended to reach similar values, regardless of the original substitution context (whether native forest or *Eucalyptus*). However, this pattern varied notably in 2013 concerning the average abundance of individuals (Figure 2b).

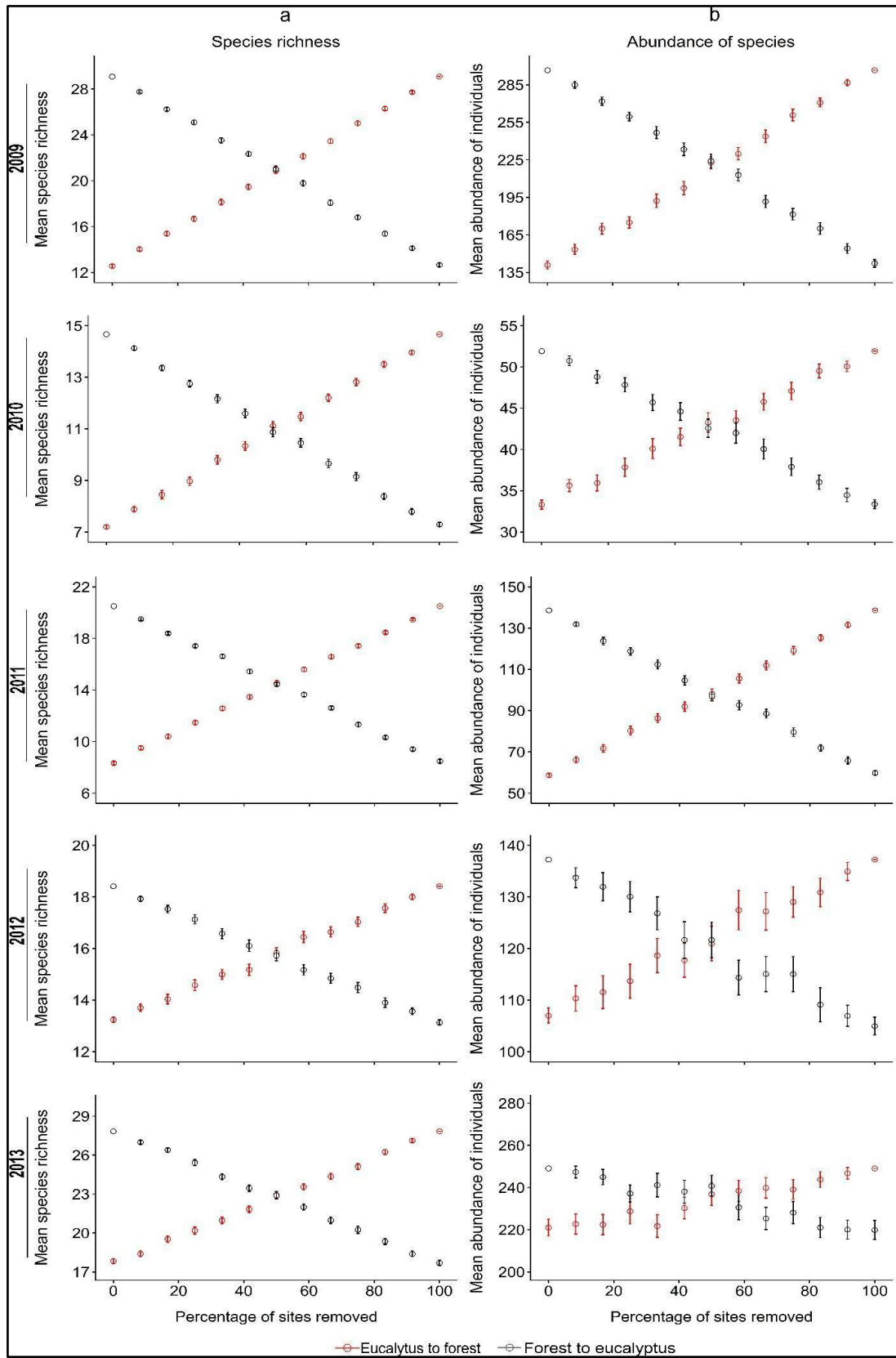


Figure 2. Responses of dung beetles to substitution between 2009 and 2013: (a) average species richness; (b) average abundance of individuals. For all metrics, the mean values are presented along with error bars representing 95% confidence intervals ($\pm$ 95% CI).

4.8.2. Regional diversity of dung beetles

Overall, our results indicate high values of gamma diversity of dung beetles during the initial percentages of substitution in the forest-to-*Eucalyptus* scenario. However, we observed a progressive decline as native forest sites are removed, and *Eucalyptus* sites increase. Conversely, in the reverse scenario (*Eucalyptus*-to-forest), a greater percentage of forest sites gradually enhances the overall richness of the communities. This pattern was not found in 2013, where dung beetle richness remained relatively stable in both scenarios, regardless of the percentage of substitution (Figure 3).

Regarding the overall mean dissimilarity of native forests (beta diversity), which reflects the variation in habitat over the years without replacement scenarios, the data show natural fluctuations particularly in 2009 and 2010 (Figure 4a) in community composition. These variations can be attributed to climatic phenomena such as El Niño, which influenced the composition during those data collection years (see Beiroz et al. 2017). When analyzing the years with replacement scenarios, our results indicate that dissimilarities remain above reference levels in both directions, varying according to the scenario's direction. In the *Eucalyptus*-to-forest scenario, dissimilarity, although initially higher, tends to decrease as native forest sites are added (Figure 4b).

In contrast, in the forest-to-*Eucalyptus* scenario, dissimilarity gradually increases as forest sites are removed and replaced by *Eucalyptus*. In both scenarios, dissimilarity stabilizes around 50% substitution, indicating converging response patterns as the proportion of respective sites increases. However, at the extremes of both scenarios particularly when only 20% corresponds to forest (80% *Eucalyptus*) or vice versa, dissimilarity between communities is greater relative to the mean proportion of substitution, as is total diversity.

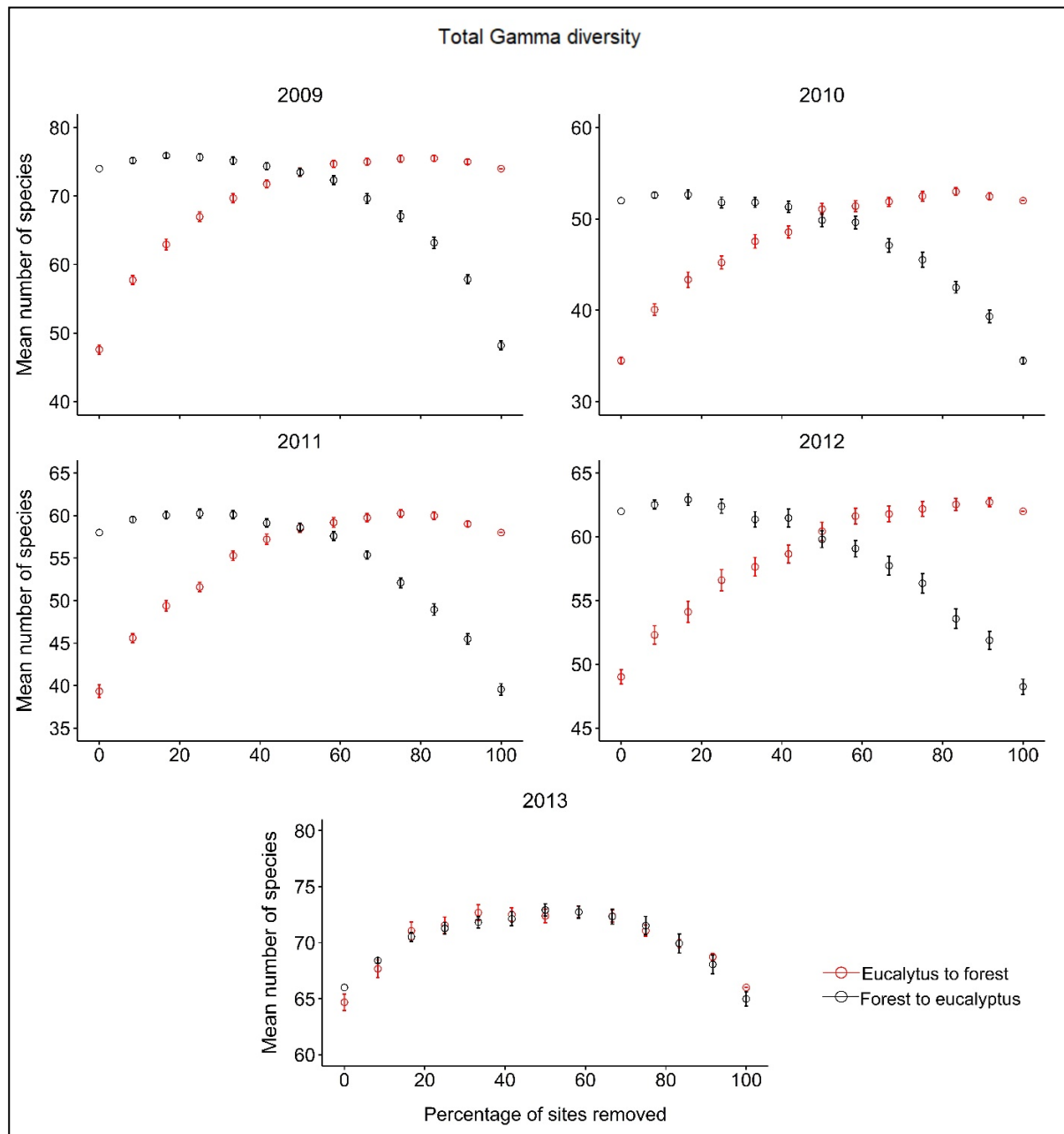


Figure 3. Total diversity of dung beetles (2009-2013). The graphs display the average number of species, with error bars representing 95% confidence intervals ($\pm$ 95% CI).

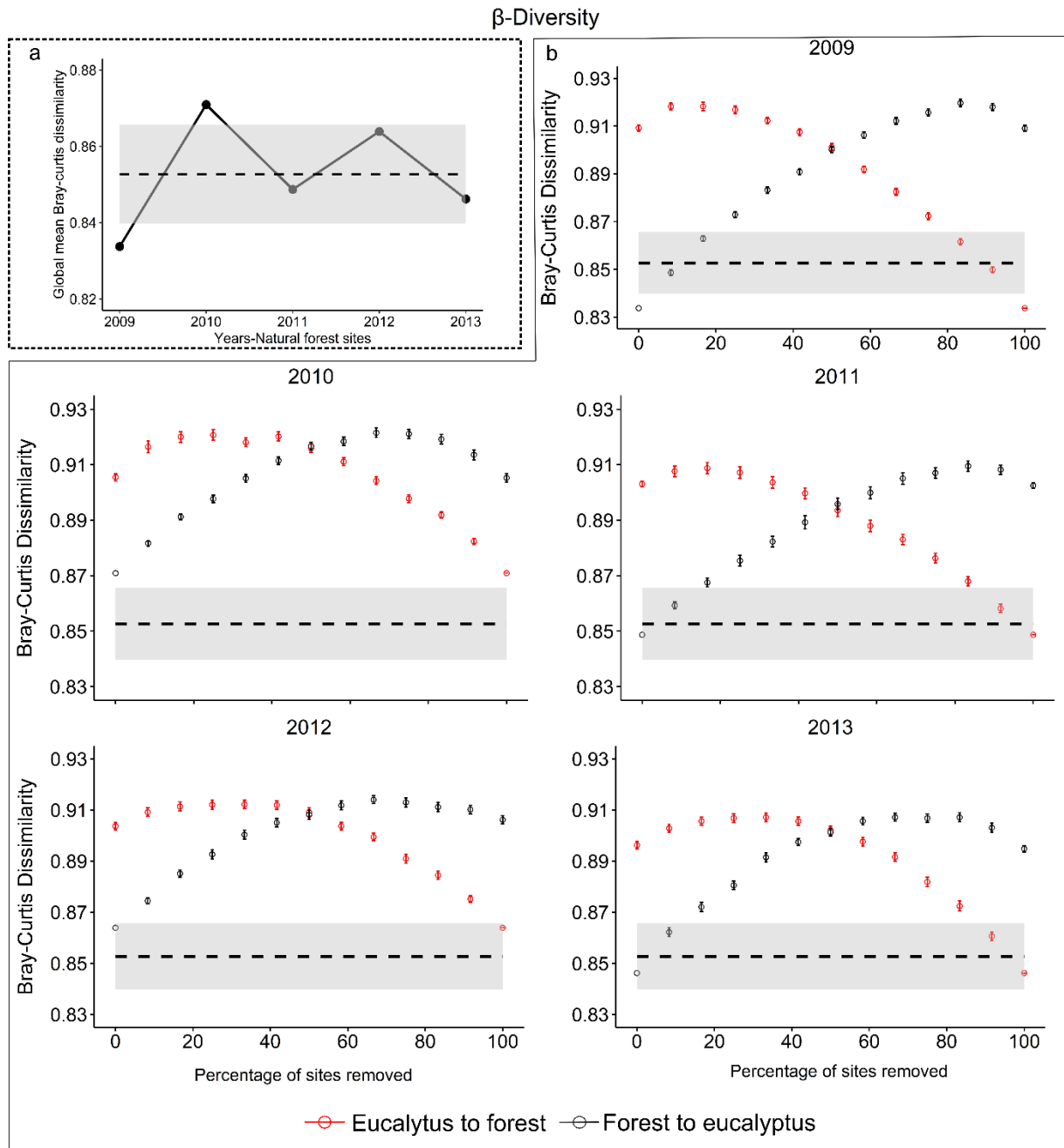


Figure 4. Response of dung beetles to substitution scenarios for the years 2009-2013 based on Bray-Curtis's dissimilarity. (a) Global beta diversity; (b) Dissimilarity based on removal and substitution scenarios. Average values are shown, with error bars indicating 95% confidence intervals ($\pm$ 95% CI), and the standard deviation for native forest (baseline) is represented by dashed lines and a gray area.

4.9. Discussion

Our results provide evidence of how the local and regional responses of dung beetles vary according to the direction and proportion of land-use changes. These findings underscore the complex dynamics of dung beetle communities in response to habitat changes, highlighting the nuanced interplay between species richness, community composition, and habitat substitution. Additionally, we observed changes in diversity associated with varying proportions of disturbed sites (*Eucalyptus* plantations) alongside primary forests, suggesting that this configuration generates heterogeneity within the beetle community. In particular, the diversity patterns in both scenarios (*Eucalyptus*-to-forest and forest-to-*Eucalyptus*) highlight how heterogeneity among sites is affected in opposing ways. These findings contrast with our initial hypothesis regarding the influence of *Eucalyptus* plantations on diversity, emphasizing the complexity of ecological responses to habitat substitution. Furthermore, we underscore that these relationships reflect dynamics over time and space, where communities may respond differently under varying conditions.

4.9.1. Scale, direction of change, and heterogeneity as factors in the response of dung beetle diversity

Our results reveal an asymmetric pattern in the response of local (alpha) and regional diversity, which varies according to the proportion of sites removed and the direction of change, whether from forest to *Eucalyptus* or vice versa. While richness and abundance at the local level show a clear trend, increasing with the conversion of *Eucalyptus* sites into forest (e.g., Barlow et al., 2007; López-Bedoya et al., 2021), the landscape scale, gamma diversity, and inter-site variability suggest the influence of processes potentially linked to the landscape heterogeneity generated by the introduction of *Eucalyptus* plantations (Beiroz et al., 2019). This promotes a more complex dynamic of ecological processes at the regional level.

Although regional diversity initially remained high in forest-to-*Eucalyptus* scenarios, it decreased as the proportion of *Eucalyptus* sites increased. This result is expected, as greater diversity is generally associated with native forest sites compared to *Eucalyptus* monocultures (Martello et al., 2024). In contrast, when forest sites were replaced by *Eucalyptus*, although diversity initially declined, it increased with the introduction of more native forest sites. This pattern suggests that, despite lower local richness in *Eucalyptus* plantations, they appear to contribute with species that enhance regional diversity as native forests are restored. This can

be explained by the structural heterogeneity that *Eucalyptus* introduces into the landscape, creating a mosaic of habitats that may favor the coexistence of less common species at the regional level (Tavares et al., 2019; Wang & Loreau, 2014).

However, we emphasize that this increase in gamma diversity does not necessarily imply a complete recovery of communities, as regional diversity in the short term may lead to homogenization, masking potential local losses (Morante-Filho et al., 2016). For instance, the results from 2013 (Figure 3) showed no differences despite changes in the proportion of substitution, suggesting that a point may be reached where, regardless of the substitution proportion, it is no longer possible to add new species or lose many, highlighting how heterogeneity can generate local diversity but may also lead to regional homogenization (Heidrich et al., 2023). Additionally, it is likely that regional diversity remains stable due to the presence of generalist species that occupy both *Eucalyptus* and forest sites, balancing community composition (Duflot et al., 2017; Marathe et al., 2021).

In contrast, beta diversity increased with the proportion of *Eucalyptus* in native forest replacement scenarios. This suggests that while local richness diminishes in plantations, the introduction of this land cover has led to an increase in community dissimilarity among sites, driven by the structural and functional heterogeneity that *Eucalyptus* adds to the landscape (Heidrich et al., 2023). This pattern of increased diversity among sites contrasts with the decline in gamma diversity, reflecting a loss in overall diversity as typical native forest species disappear (e.g., Heidrich et al., 2023).

In the inverse scenario (forest-to-*Eucalyptus*), although gamma diversity showed an increase, beta diversity progressively declined. This pattern can be explained by the greater spatial homogeneity among native forest sites compared to *Eucalyptus* plantations in our study site (e.g., Beiroz et al., 2018). As more native forest sites are added, communities tend to become more like one another, which reduces dissimilarity among sites (Marathe et al., 2021). The decrease in beta diversity suggests that forested sites tend to share more species between them, thereby reducing variability in species composition at the landscape scale. This heterogeneity may result in a "trade-off" mediated by how species distribute across the landscape (Allouche et al., 2012a; Kneitel & Chase, 2004). As the proportion of *Eucalyptus* increases, dissimilarity among sites may grow due to the introduction of generalist species, which tend to replace specialist species that are typical of native forest habitats (Regolin et al., 2020; Solar et al., 2015).

Initially, this increase in beta diversity may appear favorable, but it can lead to greater regional homogenization over the long term as specialist species decline and generalists dominate both *Eucalyptus* and native forest sites (Dambros et al., 2024). This process reflects how an increased proportion of *Eucalyptus* can enhance beta diversity while simultaneously compromising species richness and community stability at the regional scale (Leite et al., 2018). It is well known that heterogeneity in species distribution increases regional diversity (Loreau et al., 2021; Stein et al., 2014). However, this outcome is variable and depends not only on habitat configuration but also on species distribution and heterogeneity (Allouche et al., 2012b). In this context, the landscape heterogeneity created by the presence of plantations appears to play a significant role in this dynamic (see Heidrich et al., 2020). Our results demonstrate that the differences between local responses and landscape-level responses to habitat change are not symmetrical in their contributions to diversity. Therefore, although landscape-scale heterogeneity may reflect some stability due to species distribution and habitat type characteristics in the matrix (Regoli et al., 2020), this initial stability may mask potential local losses that do not necessarily manifest in beta diversity metrics (Dambros et al., 2024). It is possible that while landscape heterogeneity can increase regional diversity, local dynamics may be more sensitive to losses that are not immediately captured in site-level diversity metrics.

4.9.2. Effects of habitat substitution on community homogenization and landscape heterogeneity

Our scenarios suggest that habitat replacement does not lead to a recovery toward the original forest conditions but rather to a potential homogenization of communities. This effect is particularly pronounced when approximately 20% of the landscape is composed of *Eucalyptus* or forest. At these proportions, the coexistence of both habitat types generates greater heterogeneity in dung beetle communities, initially increasing diversity. However, as the proportion of one habitat increases, communities begin to homogenize. This pattern suggests that, although landscape heterogeneity may temporarily favor diversity in the short term, habitat replacement can lead to community simplification, especially when one habitat, such as *Eucalyptus* plantations, dominates the landscape (Sebalt et al., 2021).

While the literature does not provide a complete framework for understanding the underlying ecological mechanisms driving these patterns, our results suggest that when native forests and *Eucalyptus* plantations coexist at proportions close to 50%, a form of land-sharing

emerges. This concept has been widely used in studies on the coexistence of agricultural mosaics and natural habitat fragments, where it has been shown to support higher levels of diversity (Montoya-Molina, et al., 2016). However, there is still limited evidence on how these processes vary across different ecological contexts and temporal scales (Tscharntke et al., 2012).

One aspect highlighted by our study is the temporal asymmetry in habitat conversion processes. While the conversion of forest to *Eucalyptus* plantations occurs rapidly, recovery in the reverse direction (from *Eucalyptus* to forest) is a longer and more complex process (Crouzeilles et al., 2017). However, the literature still provides limited information on how secondary forests respond to the presence of *Eucalyptus* plantations, which restricts our ability to predict the long-term impacts of habitat replacement. Additionally, it is important to recognize the limits of this approach. The effectiveness of land-sharing will depend on multiple factors, such as the spatial scale of the landscape, the management intensity of plantations, the composition of the surrounding landscape, and the specific ecological context (Meli et al., 2019). Future research should focus on evaluating how these factors interact to determine whether the coexistence of native forests and *Eucalyptus* plantations can sustain functionally diverse communities over the long term.

Overall, these findings underscore the impact of habitat replacement on dung beetle communities, highlighting the importance of understanding these dynamics to develop effective conservation and management strategies. Finally, from a management perspective, this analysis suggests that conserving landscapes where both habitat types coexist in smaller proportions may be an effective strategy for maintaining diversity. For example, preserving native forest cover around *Eucalyptus* plantations benefits local communities (Beiroz et al., 2019) and prevents a single habitat type from completely dominating the landscape (Sebald et al., 2021).

5. Conclusion

Our results, derived from simulated habitat replacement scenarios between native forest and *Eucalyptus* plantations, reveal the complexity and asymmetry in the response of dung beetle communities to these changes. These scenarios indicate that, at the local level, the conversion of forested areas into *Eucalyptus* results in a decrease in species richness and abundance, whereas the reverse scenario may lead to partial, but not complete, recovery of diversity. At the

regional level, although regional diversity may appear stable, the heterogeneity introduced by *Eucalyptus* plantations increases dissimilarity among sites, which can mask the loss of specialized species and threaten long-term ecological stability. Additionally, community responses may vary not only based on the proportion of habitat replaced but also over time, reflecting the potential for cumulative changes in these systems. Thus, the coexistence of both habitat types in smaller proportions may be key to maintaining landscape heterogeneity, particularly in tropical forests where the presence of these types of vegetation becomes more common (Taveres et al., 2019).

5.1. Acknowledgments

ACR was supported by a master's scholarship from the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. References

- Allouche, O., Kalyuzhny, M., Moreno-Rueda, G., Pizarro, M., & Kadmon, R. (2012). Area–heterogeneity tradeoff and the diversity of ecological communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(43), 17495–17500. <https://doi.org/10.1073/pnas.1208652109>
- Barlow, J., Gardner, T. A., Araujo, I. S., Ávila-Pires, T. C., Bonaldo, A. B., Costa, J. E., Esposito, M. C., Ferreira, L. V., Hawes, J., Hernandez, M. I. M., Hoogmoed, M. S., Leite, R. N., Lo-Man-Hung, N. F., Malcolm, J. R., Martins, M. B., Mestre, L. A. M., Miranda-Santos, R., Nunes-Gutjahr, A. L., Overal, W. L., ... Peres, C. A. (2007). Quantifying the biodiversity value of tropical primary, secondary, and plantation forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(47), 18555–18560. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703333104>
- Beiroz, W., Barlow, J., Slade, E. M., Borges, C., Louzada, J., & Sayer, E. J. (2019). Biodiversity in tropical plantations is influenced by surrounding native vegetation but not yield: A case study with dung beetles in Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 444, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.04.036>
- Beiroz, W., Sayer, E., Slade, E. M., Audino, L., Braga, R. F., Louzada, J., & Barlow, J. (2018). Spatial and temporal shifts in functional and taxonomic diversity of dung beetles in a human-modified tropical forest landscape. *Ecological Indicators*, 95, 518–526. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.062>
- Crouzeilles, R., Curran, M., Ferreira, M. S., Lindenmayer, D. B., Grelle, C. E. V., & Rey Benayas, J. M. (2016). A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. *Nature Communications*, 7(1), 11666. <https://doi.org/10.1038/ncomms11666>
- Dambros, C. S., Junqueira Izzo, T., Castuera de Oliveira, L., Eduardo Vicente, R., & Peres, C. A. (2024). Beta-diversity buffers fragmented landscapes against local species losses. *Oikos*, 2024(3). <https://doi.org/10.1111/oik.10401>

- Duflot, R., Ernoult, A., Aviron, S., Fahrig, L., & Burel, F. (2017). Relative effects of landscape composition and configuration on multi-habitat gamma diversity in agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.035>
- Heidrich, L., Bae, S., Levick, S., Seibold, S., Weisser, W., Krzystek, P., Magdon, P., Nauss, T., Schall, P., Serebryanyk, A., Wöllauer, S., Ammer, C., Bässler, C., Doerfler, I., Fischer, M., Gossner, M. M., Heurich, M., Hothorn, T., Jung, K., ... Müller, J. (2020). Heterogeneity–diversity relationships differ between and within trophic levels in temperate forests. *Nature Ecology & Evolution*, 4(9), 1204–1212. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1245-z>
- Heidrich, L., Brandl, R., Ammer, C., Bae, S., Bässler, C., Doerfler, I., Fischer, M., Gossner, M. M., Heurich, M., Heibl, C., Jung, K., Krzystek, P., Levick, S., Magdon, P., Schall, P., Schulze, E.-D., Seibold, S., Simons, N. K., Thorn, S., ... Müller, J. (2023). Effects of heterogeneity on the ecological diversity and redundancy of forest fauna. *Basic and Applied Ecology*, 73, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2023.10.005>
- Kneitel, J. M., & Chase, J. M. (2004). Trade-offs in community ecology: linking spatial scales and species coexistence. *Ecology Letters*, 7(1), 69–80. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00551.x>
- López-Bedoya, P. A., Magura, T., Edwards, F. A., Edwards, D. P., Rey-Benayas, J. M., Lövei, G. L., & Noriega, J. A. (2021). What level of native beetle diversity can be supported by forestry plantations? A global synthesis. *Insect Conservation and Diversity*, 14(6), 736–747. <https://doi.org/10.1111/icad.12518>
- Loreau, M., Barbier, M., Filotas, E., Gravel, D., Isbell, F., Miller, S. J., Montoya, J. M., Wang, S., Aussenac, R., Germain, R., Thompson, P. L., Gonzalez, A., & Dee, L. E. (2021). Biodiversity as insurance: from concept to measurement and application. *Biological Reviews*, 96(5), 2333–2354. <https://doi.org/10.1111/brv.12756>
- Marathe, A., Priyadarsanan, D. R., Krishnaswamy, J., & Shanker, K. (2021). Gamma diversity and under-sampling together generate patterns in beta-diversity. *Scientific Reports*, 11(1), 21420. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99830-8>
- Martello, F., Dáttilo, W., Souza-Campana, D. R., Medeiros, H. R., Silva, R. R., Ribeiro, M. C., & Morini, M. S. C. (2024). Eucalyptus plantation reduces diversity and disrupts predator-prey correlations of soil invertebrates within Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, 553, 121592. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121592>
- Meli, P., Rey-Benayas, J. M., & Brancalion, P. H. S. (2019). Balancing land sharing and sparing approaches to promote forest and landscape restoration in agricultural landscapes: Land approaches for forest landscape restoration. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 17(4), 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.09.002>
- Montoya-Molina, S., Giraldo-Echeverri, C., Montoya-Lerma, J., Chará, J., Escobar, F., & Calle, Z. (2016). Land sharing vs. land sparing in the dry Caribbean lowlands: A dung beetles' perspective. *Applied Soil Ecology*, 98, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.017>
- Morante-Filho, J. C., Arroyo-Rodríguez, V., & Faria, D. (2016). Patterns and predictors of β -diversity in the fragmented Brazilian Atlantic forest: a multiscale analysis of forest specialist and generalist birds. *Journal of Animal Ecology*, 85(1), 240–250. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12448>
- Pinto Leite, C. M., Mariano-Neto, E., & Rocha, P. L. B. da. (2018). Biodiversity thresholds in invertebrate communities: The responses of dung beetle subgroups to forest loss. *PLOS ONE*, 13(8), e0201368. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201368>

- Regolin, A. L., Ribeiro, M. C., Martello, F., Melo, G. L., Sponchiado, J., Campanha, L. F. de C., Sugai, L. S. M., Silva, T. S. F., & Cáceres, N. C. (2020). Spatial heterogeneity and habitat configuration overcome habitat composition influences on alpha and beta mammal diversity. *Biotropica*, 52(5), 969–980. <https://doi.org/10.1111/btp.12800>
- Sebald, J., Thrippleton, T., Rammer, W., Bugmann, H., & Seidl, R. (2021). Mixing tree species at different spatial scales: The effect of alpha, beta and gamma diversity on disturbance impacts under climate change. *Journal of Applied Ecology*, 58(8), 1749–1763. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13912>
- Solar, R. R. de C., Barlow, J., Ferreira, J., Berenguer, E., Lees, A. C., Thomson, J. R., Louzada, J., Maués, M., Moura, N. G., Oliveira, V. H. F., Chaul, J. C. M., Schoereder, J. H., Vieira, I. C. G., Mac Nally, R., & Gardner, T. A. (2015). How pervasive is biotic homogenization in human-modified tropical forest landscapes? *Ecology Letters*, 18(10), 1108–1118. <https://doi.org/10.1111/ele.12494>
- Stein, A., Gerstner, K., & Kreft, H. (2014). Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. In *Ecology Letters* (Vol. 17, Issue 7, pp. 866–880). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/ele.12277>
- Tavares, A., Beiroz, W., Fialho, A., Frazão, F., Macedo, R., Louzada, J., & Audino, L. (2019). Eucalyptus plantations as hybrid ecosystems: Implications for species conservation in the Brazilian Atlantic forest. *Forest Ecology and Management*, 433, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.063>
- Tscharntke, T., Tylianakis, J. M., Rand, T. A., Didham, R. K., Fahrig, L., Batáry, P., Bengtsson, J., Clough, Y., Crist, T. O., Dormann, C. F., Ewers, R. M., Fründ, J., Holt, R. D., Holzschuh, A., Klein, A. M., Kleijn, D., Kremen, C., Landis, D. A., Laurance, W., ... Westphal, C. (2012). Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses. *Biological Reviews*, 87(3), 661–685. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2011.00216.x>
- Wang, S., & Loreau, M. (2014). Ecosystem stability in space: α , β and γ variability. *Ecology Letters*, 17(8), 891–901. <https://doi.org/10.1111/ele.12292>

7. Parte IV: Divulgação científica

Na era digital, as redes sociais revolucionaram a forma como a ciência chega ao público. Plataformas como Twitter, Instagram e YouTube permitem que pesquisadores e comunicadores científicos compartilhem conhecimentos de maneira acessível, visual e atrativa. Utilizando essas ferramentas digitais, apresento aqui, como uma medida de divulgação científica, informações publicadas nas redes sociais (Instagram) no perfil do "LECIN" (Laboratório de Ecologia e Conservação de Invertebrados) sobre o meu trabalho de mestrado desenvolvido durante este período, especificamente relacionado ao meu táxon de estudo, cenários de simulação, plantações e florestas nativas (ver 7.1).

Além disso, como alternativas não digitais, apresento arquivos fotográficos (ver 7.2) que mostram palestras para estudantes do Centro para Desenvolvimento do Potencial e Talento (CEDET), onde foram compartilhadas informações sobre insetos e seu papel na conservação.

7.1. Média de divulgação: rede social para divulgação

Você sabia?

Descubra como a substituição de áreas florestais por plantações de eucalipto e vice-versa afeta as comunidades de besouros rola-bosta.

Esses pequenos gigantes da natureza desempenham papéis-chave nos ecossistemas, e nossa pesquisa analisa as mudanças em sua diversidade e abundância.

Deslize para entender

Transformações da paisagem: impacto na biodiversidade

Em nossa pesquisa, exploramos como as proporções variáveis desses habitats na paisagem influenciam as respostas da diversidade em nível local e regional de besouros rola-bosta.

Os resultados vão te surpreender!

#CiênciaParaTodos #Biodiversidade #Ecologia #UsoDaTerra

O que encontramos?

- 1 Conversão de florestas em eucaliptos:
 - Redução na riqueza e abundância de espécies.
- 2 Cenário inverso (eucalipto para floresta):
 - Recuperação parcial, mas não completa, da diversidade.

Essas simulações nos permitiram analisar as respostas dos besouros rola-bosta diante de mudanças no uso da terra.

•• Próximo post: Resultados legais!

Coexistência de ambos tipos de habitat:

A heterogeneidade ajuda a manter certa diversidade estrutural, mas o aumento de eucaliptos aumenta a dissimilaridade entre os sítios, mascarando a perda de espécies.

Por que esse estudo é importante?

Nossos resultados mostram como o efeito da substituição de habitats varia em diferentes escalas. Em escala local, um maior percentual de eucalipto reduz a riqueza e abundância de espécies, enquanto em escala regional, a heterogeneidade da paisagem aumenta a dissimilaridade, o que pode mascarar a perda de espécies.

Em breve compartilharemos os resultados completos! Fique atento/a.

#Ecologia #Conservação #Biodiversidade

Gostou?

Este conteúdo é baseado na minha dissertação. Eu sou Arnol Cardozo R. Aluno de mestrado do programa de pós-graduação em entomologia na universidade Federal de Lavras

#DungBeetle #ciênciaParaCompartilhar #entomologia

Figura S1. Carrossel que explica de forma geral a um público não cientista como a transformação (substituição de habitat) impacta diferentes métricas de diversidade de besouros rola-bosta. Este material é baseado nos resultados da dissertação. **Visitar Lecin. Ufla**

7.1.2. Divulgação de informações para comunidades não acadêmicas



Figura S2. Compartilhando junto com pessoal do laboratório conhecimento sobre besouros rola bosta com alunos do cedet.