



ASPECTOS ECOLÓGICOS DAS PAISAGENS RUPESTRES

ECOLOGICAL ASPECTS OF RUPESTRIAN LANDSCAPES

Submetido em: 09/05/2022

Aprovado em: 09/06/2022

Lucas Neves Perillo^{1,2}

RESUMO

Existem diversos conceitos de paisagem, que carregam tanto aspectos subjetivos quanto objetivos nas suas definições. Existe em grande parte dos alunos e em alguns pesquisadores uma confusão no uso da abordagem de ecologia de paisagem. Os conceitos se confundem entre os diferentes níveis hierárquicos e a sua relação entre múltiplas escalas ao longo do tempo e no espaço. Para discutir as relevantes abordagens dentro do espectro de ecologia de paisagens, apresento um ambiente megadiverso e heterogêneo, o Campo Rupestre. Esse ecossistema montanhoso é um verdadeiro laboratório natural para se estudar a diversidade biológica em diferentes contextos ecológicos. Nele, a maioria das espécies se distribui em metacomunidades, que ocupam os diversos ambientes da paisagem, variando de ilhas naturais de floresta à afloramentos rochosos isolados.

Palavras-chave: escalas. hierarquia ecológica. biodiversidade. paisagens rupestres.

ABSTRACT

There are several concepts of landscape, which carry both subjective and objective aspects in their definitions. There is, in most students and in some researchers, a confusion within the use of the landscape ecology approach. The concepts are confused among different hierarchical levels and its relationship between multiple scales over time and space. To discuss relevant approaches within the landscape ecology spectrum, I present a mega-diverse and heterogeneous environment, the Campo Rupestre. This Brazilian mountain ecosystem is a true natural laboratory for studying biological diversity in different ecological contexts. In it, most of the species are distributed in metacommunities that occupy the different environments of the landscape, ranging from natural forest islands to isolated rocky outcrops.

Keywords: *scale. ecological hierarchy. biodiversity. rupestrian landscapes.*

¹ Residente pós-doutoral do Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, ICB/Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG Brasil. Contato: lucasperillo@ufmg.br

² Diretor da Bocaina Biologia da Conservação, Belo Horizonte, MG Brasil

1 PAISAGENS COMO UM CONCEITO

1.1 Múltiplos significados de paisagem

Ao longo do tempo, inúmeros conceitos de paisagem surgiram. Alguns sofreram modificações, foram utilizados com distintas conotações (STRACHULSKI, 2015) e foram alvo de diversas interpretações dentro de vários campos do conhecimento (SALVIO, 2018; LAJE, 2018). Em síntese, além da sua concepção objetiva, apoiada nos fundamentos do racionalismo (OLIVEIRA; LOBÃO; ARAÚJO, 2018), devemos considerar a ideia subjetiva do termo paisagem, considerando seus aspectos particulares, culturais, focados em uma apreciação estética. Os componentes intangíveis, como aqueles inerentes à percepção ambiental, à valorização da beleza cênica, pertencem ao sujeito pensante e ao seu íntimo. Os arquitetos enxergam paisagem considerando seus aspectos funcionais, estéticos, paisagísticos e até mesmo englobando conceitos mais complexos, como planejamento territorial. Temos na Paisagem Cultural uma maneira de indicar os bem de interesse de preservação cultural. O termo Paisagens Mentais é inclusive aplicado para denominar nossas memórias que têm relação com o mundo (FAIRCLOUGH; MØLLER, 2008).

É válido pensar que a paisagem está sempre em mudança. Além dos conceitos refletirem o pensamento de uma época específica, as escalas temporais também são importantes para definir o que é e o que deixa de ser uma paisagem. Laje (2018) defende o uso de paisagem como uma categoria de pensamento, um modo típico de entendimento do mundo, incluindo sua subjetividade inerente. A autora sugere que evitemos a simplificação da noção de paisagem, já que a categorização apenas gera um empobrecimento do conceito. “Como conceito, a paisagem não respeita os limites disciplinares” (HOWARD; THOMPSON; WATERTON, 2013). Logo, seu uso e concepção devem ser integrativos.

O mundo está cheio de coisas que possuem características próprias e que se relacionam entre si (CHEN, 2002). Os filósofos, sobretudo Platão e Aristóteles, se comprometeram com a ideia de que o que possibilita a existência de uma determinada coisa é a sua essência. Essa metafísica de substância propõe que para os tipos naturais discretos (i.e., singulares, distintos), apenas seu conjunto de propriedades definidoras são suficientes para a sua distinção. Mas paisagem é uma ideia e não uma coisa (FAIRCLOUGH; MØLLER, 2008). Coutinho, Martins e Neves (2012) defendem que este modo de pensar estritamente “substancialista” dificulta a compreensão de conceitos e inclusive de teorias ecológicas. Como alternativa, uma metafísica de processos começou a ser considerada. Além de reconhecer que os processos naturais são

precursores dos elementos da natureza, este modo de pensamento propõe que os processos constituem aspectos fundamentais do que é real (RESCHER, 1996). Logo, a descrição dos fenômenos ecológicos precisa considerar mudança e desenvolvimento como parte do conhecimento. De fato, a natureza é o processo.

Nem mesmo entre os ecólogos, grupo do qual faço parte, a definição de paisagem é consensual. Diferentes áreas utilizam o termo com conceitos distintos. Isso se deve ao fato de que “paisagem” se refere à categoria de conceitos complexos. As paisagens, e todos os processos ecológicos que elas abrigam, compartilham propriedades com outros sistemas complexos, pois contêm um grande número de componentes heterogêneos que interagem de várias maneiras (NEWMAN et al., 2019). Portanto, precisamos delimitar recortes temporais e espaciais para viabilizar a realização de um trabalho científico baseado em conceitos complexos (MARTINS, 2022).

1.2 Visões ecológicas da paisagem

As paisagens começaram a ser objeto de interesse dos naturalistas, sobretudo no final do século XIX, quando o célebre Alexander von Humboldt (1769-1859) realizou incursões nas montanhas tropicais, documentando diversas descobertas sobre biogeografia, botânica e zoologia. Durante a expedição ao Monte Chimborazo (localizado no Equador), Humboldt idealizou sua maravilhosa *Naturgemälde* (pintura da natureza) (FIG. 1), um diagrama minucioso que retrata a relação entre as faixas elevacionais da montanha e suas respectivas zonas vegetacionais. Esta obra é uma confluência da ciência e da arte que ilustra a constatação do naturalista de que a vegetação se altera à medida que subimos uma montanha. Com o entendimento de que as espécies têm uma distribuição heterogênea na paisagem, Humboldt começou a formular possíveis hipóteses para explicar padrões locais e globais da distribuição da vegetação (HUMBOLDT, 2010). Humboldt conseguiu compreender a paisagem geográfica no sentido moderno, ou seja, como subjetiva e objetiva, objeto de emoção e de análise ao mesmo tempo (MILLÁN, 2014).

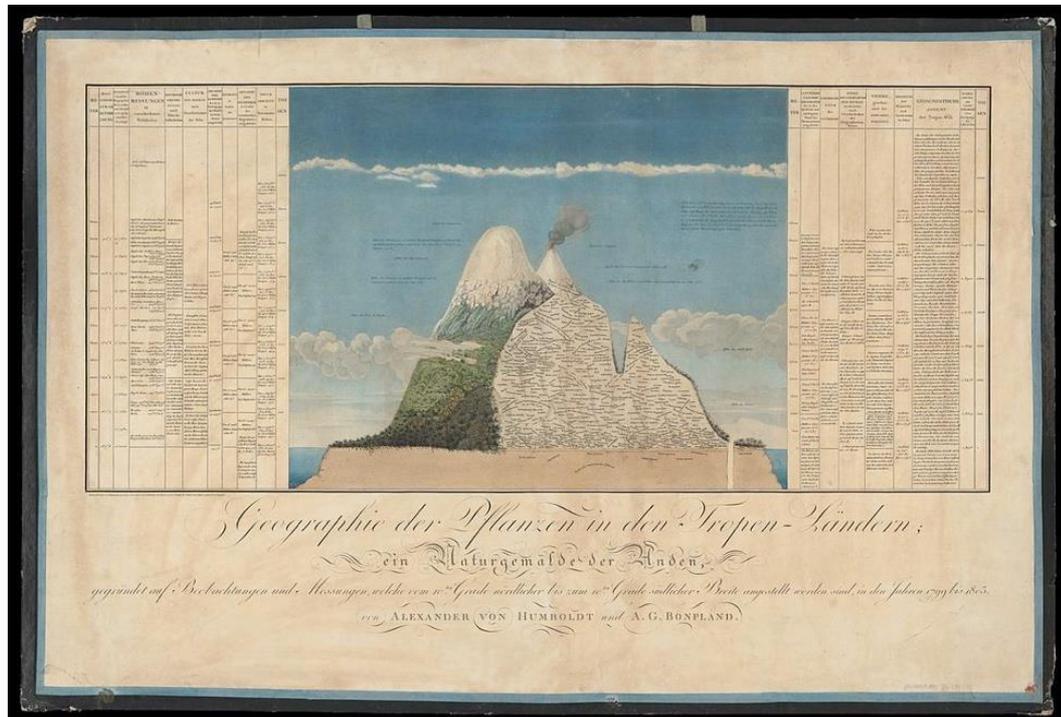


Figura 1. A pintura da natureza (*Naturgemälde*), síntese de Alexander von Humboldt sobre a distribuição diferenciada dos organismos na paisagem no vulcão Chimborazo localizado no atual Equador.

Humboldt foi uma das maiores inspirações de Charles Darwin. Sua Teoria da Evolução está intrinsecamente relacionada aos aspectos da biogeografia, com isolamentos e seleção diferenciada de caracteres. Os *insights* da teoria tiveram início durante a expedição naturalista que Darwin acompanhou, a bordo do navio Beagle entre os anos de 1832 e 1836:

Darwin levou a Narrativa pessoal de Alexander von Humboldt, um relato em sete volumes da expedição à América Latina e o motivo pelo qual Darwin estava a bordo do Beagle. “A minha admiração por sua famosa narrativa pessoal (parte da qual conheço de cor)” disse Darwin, “fez com que eu decidisse viajar para países distantes e me levou a me candidatar como naturalista voluntário no navio de sua majestade, o Beagle” (WULF, 2016, p. 314-315).

Somente muito tempo depois, a expressão “ecologia de paisagem” foi cunhada pelo alemão Carl Troll (1899-1975) que, apaixonado pela visão humboldtiana da natureza, desenvolveu sua jornada de pesquisa nas montanhas dos países andinos sul-americanos. O geógrafo descreve a espacialidade como a noção base de paisagem e o estudo da heterogeneidade do espaço onde o homem habita como seu principal interesse (TROLL, 1971). Ele aprofundou as terminologias desta nova área do conhecimento e ainda foi pioneiro na

utilização de fotografias aéreas para estudos de relacionando meio ambiente e diversidade de vegetação, um dos pilares da ecologia de paisagens moderna.

2 ASPECTOS ECOLÓGICOS DA PAISAGEM

2.1 Escalas ecológicas e heterogeneidade

Considerando toda a evolução do conceito de paisagem ao longo do tempo não é difícil imaginar que, quando nos deparamos com o termo paisagem naturais, instintivamente o relacionamos a uma grande escala. Herança da visão grandiosa que temos de paisagens dos movimentos positivistas e naturalistas. Mas a ecologia de paisagens não aborda necessariamente macro-escalas.

A expressão “ecologia de paisagens” pode ser enganadora – a ecologia de paisagens não trata necessariamente de escalas espaciais extensas (para humanos), mas de escalas que são extensas em relação a uma espécie ou a um fenômeno de interesse de modo que padrões espaciais sejam relevantes (GUREVITCH; SCHEINER; FOX, 2009).

Outro elemento que pode confundir o entendimento da ecologia de paisagens é o fato de que grande parte das discussões ecológicas são apresentadas dentro dessa perspectiva hierárquica. Dividir a diversidade biológica em níveis hierárquicos de organização agrupados em uma ordem crescente de complexidades facilita os estudos ecológicos. Mas paisagem não pode ser definida *per se* como um nível hierárquico, apesar de que população, comunidade e ecossistema também são considerados conceitos complexos. Inclusive, o mesmo elemento de estudo pode apresentar dinâmicas diferentes para cada nível hierárquico, mudando apenas o enfoque ou a perspectiva do estudo (METZGER, 2001). Dentro de um mesmo fragmento florestal, podemos estudar ecologia de populações, levando em consideração a influência da competição entre indivíduos de uma determinada espécie, estudar redes de interações entre espécies na ótica de comunidades e até mesmo ecologia de ecossistemas, considerando a variação do fluxo de energia naquela paisagem. De fato, propriedades com dependência de escala e emergência (uma consequência importante da organização hierárquica na qual novas propriedades surgem à medida que os componentes se combinam) não são simplesmente características compartilhadas por sistemas complexos, mas sim atributos diagnósticos deles (NEWMAN et al., 2019).

Uma ótima síntese em português foi escrita por Jean Paul Metzger (2001). Nela, o autor reforça que a escala é definida pelo observador, resultando em análises em micro-escalas ou macro-escalas em função, em especial, do tamanho e da capacidade de deslocamento da(s) espécie(s) considerada(s). Os pesquisadores devem estar atentos a quais métricas devem considerar para extrair as melhores variáveis que expressam o mosaico da paisagem. Variações no tamanho das manchas, conectividade, distância do vizinho mais próximo, uso do solo, tamanho corporal e capacidade de dispersão dos organismos modelo (LARSEN; HARGREAVES, 2020). São inúmeras as possibilidades de representação espacial das heterogeneidades do ambiente (MCGARIGAL; CUSHMAN; ENE, 2012). E como existe uma infundável variação natural na configuração dos ambientes, muitos projetos experimentais podem ter um análogo na natureza. O desafio é escolher a escala apropriada para responder a pergunta em questão e justificar tais escolhas explicitamente (HUFBAUER et al., 2015).

2.2 O movimento das espécies na paisagem

Uma das grandes questões da ecologia é entender como funciona a distribuição diferenciada dos organismos na paisagem. Os recursos e condições variam ao longo do tempo e do espaço, e essa distribuição heterogênea gera manchas adequadas para proporcionar, dependendo da espécie, a possibilidade de sua sobrevivência, seu crescimento e/ ou sua reprodução. A ocorrência de cada espécie depende de quais são as suas demandas, ancoradas no seu nicho, um hipervolume composto por n dimensões correspondentes a cada fator ambiental relevante (HUTCHINSON, 1957). A capacidade de dispersão também é um processo que pode limitar a presença e o estabelecimento de uma determinada espécie. Portanto, fatores abióticos (como o clima e recursos essenciais), fatores bióticos (como interações entre espécies) e a capacidade de movimentação (dispersão) determinam se uma espécie existe ou não em uma determinada paisagem (SOBERÓN; PETERSON, 2005). Apesar de existirem inúmeros motivos que causam essas variações no tempo e no espaço, podemos encontrar padrões consistentes de distribuição de espécies, considerando explicações desde a escala local até a global. Como exemplo, essas variáveis preditivas podem estar relacionadas ao clima, como variações de temperatura e precipitação, ou às características do solo, como profundidade ou a composição de seus elementos físico-químicos. Padrões de gradientes latitudinais e elevacionais podem ser determinados por esses mecanismos, gerando heterogeneidade ambiental.

Existe um arcabouço teórico que nos auxilia a pensar na ecologia de paisagens. As próprias ideias de George Evelyn Hutchinson (1957) consolidando a Teoria de Nicho (veja acima) serviram como base para entender os requisitos necessários para a possibilidade de existência ou ausência de uma espécie em uma área com determinadas características bióticas e abióticas. Logo depois, na década de 1960, o surgimento da Teoria da Biogeografia de Ilhas propôs um modelo baseado em fonte-sumidouro, no qual o tamanho de ilhas oceânicas e a distância entre elas são de extrema importância para determinar a presença e ausência de espécies. O uso do trabalho de Robert MacArthur (aluno de doutorado de Hutchinson) e Edward O. Wilson (1967) foi extrapolado para outros ambientes, inclusive terrestres, utilizando ilhas de recurso (ou de habitat) como modelo (MACARTHUR; WILSON, 1967). Ainda hoje é essencial para o planejamento de áreas protegidas em ambientes continentais. Em seguida, a Teoria de Metapopulações trouxe mais elementos para esta configuração espacial, levando em consideração que a dinâmica das espécies é resultado das inter-relações entre populações locais e os fluxos de indivíduos entre elas, gerando riscos diferenciados de extinção, migração ou (re)colonização (LEVINS, 1969; HANSKI; GILPIN, 1991). Em paralelo, a mesma ideia (modelo baseado em colonização-extinção) foi estendida para as comunidades (LEIBOLD et al., 2004). Essa estrutura de metacomunidades trouxe novas perspectivas para entender os fluxos de dispersão de espécies potencialmente interagentes como um *proxy* de isolamentos espaço-temporais. Mais recentemente, uma abordagem adicional intitulada *Habitat Amount Hypothesis* (Hipótese da Quantidade de Habitat) (FAHRIG, 2013) sugere o uso da quantidade de um habitat específico como preditor de qualidade da paisagem ao invés do uso de métricas de tamanho e isolamento de manchas.

Todo esse arcabouço teórico contribuiu para as relações entre padrões espaciais e processos ecológicos. Neste cenário, a ecologia da paisagem se consolidou no início dos anos 1990 como uma nova maneira de analisar as causas e consequências dos padrões espaciais em paisagens (WIENS et al., 1993), que procura entender como diferentes padrões de organização espacial das unidades da paisagem (espaço de terreno com características comuns) influem sobre seu funcionamento. “A ecologia de paisagens pode ser assim entendida como uma ecologia de interações espaciais entre as unidades da paisagem” (METZGER, 2001).

2.3 Tamanho não é documento

O ano de 1989 foi importante para John Wiens. O autor publicou um artigo pioneiro sobre escalas espaciais em ecologia (WIENS, 1989) simultaneamente a um no qual ele

considerou paisagens relevantes para o mundo dos besouros, com o apoio do seu colega Bruce Milne (WIENS & MILNE 1989). A dupla teve um importante *insight* e disseram que se os sistemas forem dimensionados adequadamente para ajustar as diferenças de tamanho corporal e área de vida entre os organismos, seus mosaicos de paisagem podem se tornar geométrica e contextualmente semelhantes.

Podemos usar as respostas dos organismos à geometria fractal de suas paisagens para desenvolver teorias independentes de escala de como, digamos, a fragmentação da paisagem pode influenciar organismos de tamanhos bem diferentes que percebem seus ambientes de maneiras bem diferentes? (WIENS & MILNE 1989).

Temos a possibilidade de trabalhar ecologia de paisagens em diferentes escalas. Desde a distribuição global de uma espécie cosmopolita até micropaisagens experimentais. Podemos até trabalhar com partição vertical de comunidades com, por exemplo, ecologia de paisagem de anfíbios distribuídos em um tronco da árvore (FOUILLOUX et al., 2021). As possibilidades são múltiplas. Recentemente, diversos artigos foram publicados sobre ecologia de paisagem microbiana (veja MONY et al., 2021). Microrganismos podem encontrar em poucos centímetros um mundo heterogêneo que vai conter todos os elementos da sua história de vida. Ao permitir que os pesquisadores manipulem características geográficas de interesse, como replicar experimentalmente paisagens ou controlar colonização e fluxo de espécies, podemos usar as micropaisagens para realizar testes explícitos dos fundamentos ecológicos e evolutivos das distribuições de espécies (LARSEN; HARGREAVES, 2020).

3 PAISAGENS RUPESTRES

3.1 Um antigo exemplo abrigado nas montanhas

Podemos utilizar ambientes rupestres como um exemplo intrigante de como a paisagem biológica pode ser estudada considerando diferentes aspectos e escalas. Amparado pelo componente subjetivo da paisagem, trago um exemplo familiar, sobretudo para os mineiros (e baianos) que vivem perto das montanhas. Estamos acostumados a nos deparar com um ambiente rupestre e às vezes nos esquecemos o quão raro é encontrar este tipo de ecossistema. Me refiro ao Campo Rupestre, o ecossistema brasileiro com o maior número de espécies vegetais por área, já que abriga mais de 15% da diversidade de plantas vasculares do país (mais

de 5.000 espécies) em uma área que ocupa somente 0,78% do território brasileiro (SILVEIRA et al., 2016). Para se ter ideia, este ecossistema raro recebeu o status de região mais rica em espécies no Brasil, país mais rico em número de espécies do mundo (FERNANDES et al., 2020). O Campo Rupestre é um ecossistema de paisagens predominantemente abertas e se localiza nos afloramentos rochosos dos cumes de algumas montanhas brasileiras (SILVEIRA et al., 2016), sobretudo nas elevações acima de 900 metros da Cordilheira do Espinhaço.

O Espinhaço é o complexo montanhoso mais antigo e extenso do Brasil (VASCONCELOS et al., 2020). Se estende por mais de 1.200 km norte-sul entre os estados da Bahia e Minas Gerais e atua como uma importante barreira à umidade que vem do Oceano Atlântico, sendo responsável por dividir o Cerrado a oeste (formação campestre) e a Mata Atlântica a leste (formação florestal), além da Caatinga a nordeste. Os dois primeiros biomas são *hotspots* de biodiversidade, ambientes que abrigam uma alta porcentagem de espécies endêmicas e têm alterações drásticas dos ambientes (FERNANDES, 2016; SILVEIRA et al., 2016).

O Campo Rupestre possui grande importância estratégica para a conservação de ambientes naturais únicos, com grande diversidade de espécies e recursos naturais. Mas, apesar da abundância de formas viventes encontradas, são paisagens normalmente com solos pobres, com alta toxicidade, e com déficit hídrico. É a diversidade na adversidade (VINCENT; JACOBI; ANTONINI, 2002; LE STRADIC; BUISSON; FERNANDES, 2015). Sua formação rochosa é de origem pré-cambriana (AB'SÁBER, 2000) e são consideradas paisagens antigas e inférteis, climaticamente tamponadas, que variam pouco ao longo do tempo (*old climatically-buffered infertile landscapes* - OCBILs) (HOPPER; SILVEIRA; FIEDLER, 2016), contendo provavelmente a mais antiga vegetação aberta do leste da América do Sul (SILVEIRA et al., 2016). Várias espécies são altamente restritas a certas elevações ou faixas latitudinais, e espécies endêmicas são relativamente comuns no Campo Rupestre. Veja como exemplo os anfíbios (LEITE; ETEROVICK; JUNCÁ, 2008; OSWALD et al., 2022), as aves (CHAVES et al., 2014), abelhas, vespas e formigas (COSTA et al., 2015; PERILLO et al., 2021) e plantas (MOTA et al., 2018).

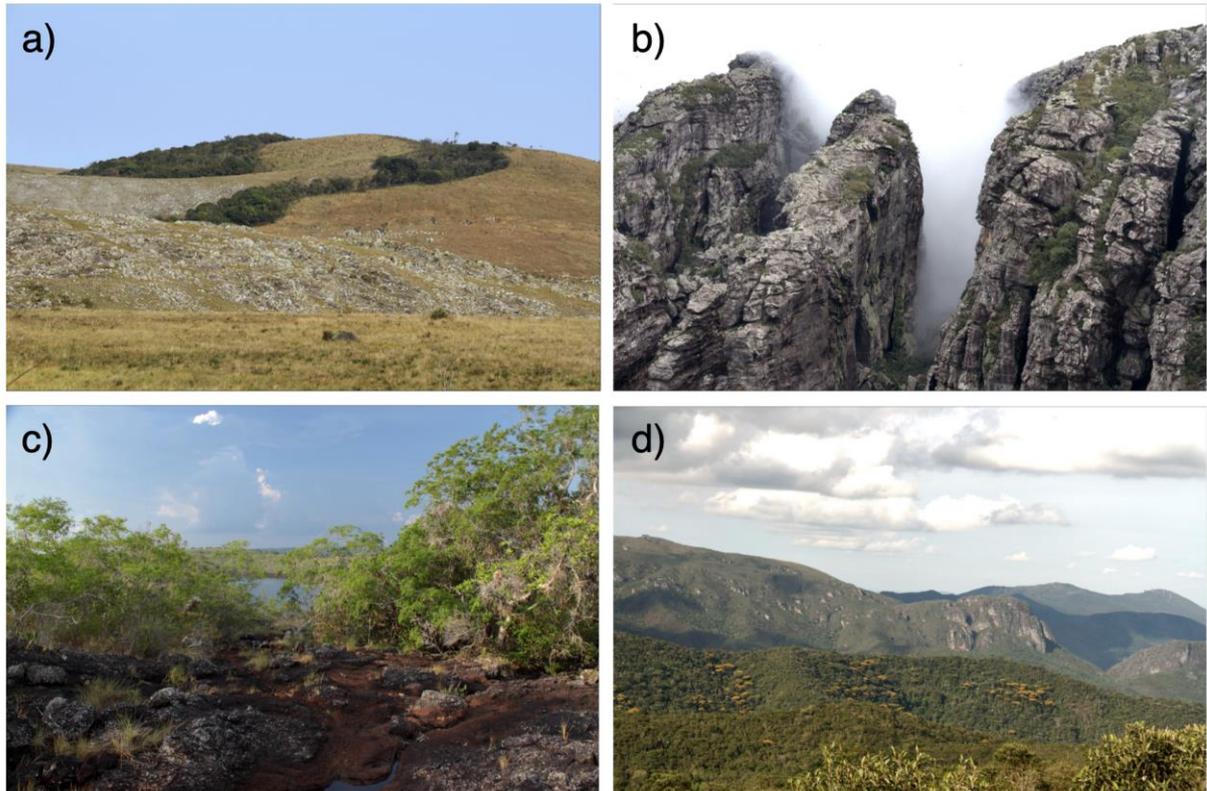


Figura 2. As heterogêneas paisagens dos Campos Rupestres. a: campos abertos arenosos, capões de mata e afloramentos rochosos (Serra do Cipó - MG); b: afloramentos rochosos (RPPN Santuário do Caraça – MG); c: afloramentos ferruginosos (canga), matas de galeria e lago (Serra dos Carajás - PA); d: Mata Atlântica, campos abertos e afloramentos rochosos. Fotos: Lucas Perillo.

3.2 Múltiplas paisagens

Apesar do ecossistema ter uma vegetação predominantemente campestre, é espantosa a sua heterogeneidade de paisagens e formações (RAPINI et al., 2008). Muitos fatores contribuem para a grande variação estrutural e para a megadiversidade biológica, sobretudo a enorme variedade de condições ambientais associadas às montanhas. Condições edáficas, climáticas e topográficas variam na paisagem. Existe uma considerável variação de elevação (ALVES et al., 2014), que causa o isolamento das populações entre e dentro das montanhas (OSWALD et al., 2022; CHAVES et al., 2014). Como parte de uma das paisagens mais antigas da Terra, evoluídas sob estabilidade tectônica e intemperismo extremo, a idade ancestral de suas formações geológicas abriga representantes de clados distintos, com a presença de endemismos (ECHTERNACHT et al., 2011). A variedade de microclimas é evidente (BARBOSA; FERNANDES; SANCHEZ-AZOFEIFA, 2015), com grande amplitude térmica diária e elevadas taxas de insolação (JACOBI et al., 2007)

Observamos uma considerável diversidade de pedoambientes (diferentes solos) e mosaicos de vegetação associados, em grande parte determinados pela topografia local e aspectos microambientais (VINCENT; MEGURO, 2008). Os Campos Rupestres ocorrem sobretudo em solos extremamente inférteis derivados de quartzitos e arenitos (rochas ricas em sílica que são metamórficas e sedimentares, respectivamente), e afloramentos ferruginosos (rochas ricas em ferro) (CARMO; KAMINO, 2015). Ainda são encontradas em menor quantidade rochas ígneas, metapelíticas, conglomerado e calcário (SCHAEFER et al., 2016).

Além de considerar as paisagens de rochas nuas, encontramos a presença de um mosaico vegetacional com matriz campestre e fisionomias florestais. Brejos de altitude, florestas nebulares, matas de galeria e capões de mata (ilhas de mata com vegetação arbórea) também ocupam a paisagem (COELHO et al., 2016). Até mesmo o fogo tem papel importante, já que ao nível da paisagem, afloramentos rochosos, rios e matas ciliares impedem a propagação do fogo pela falta de combustível, gerando um ambiente mais heterogêneo a longo prazo (FIGUEIRA et al., 2016). O estresse em nível local pode elevar a riqueza de espécies no nível da paisagem (MONTEIRO et al., 2017).

3.3 Estudos ecológicos das paisagens rupestres

Temos nas paisagens montanhosas, sobretudo no nosso Campo Rupestre, verdadeiros laboratórios naturais para se estudar a biodiversidade em diferentes escalas (SILVEIRA et al., 2019). Devido às suas características, os Campos Rupestres têm algumas particularidades, já que o ecossistema é composto por uma paisagem heterogênea, com manchas (de recursos, populações e ambientes) distribuídas em um padrão de arquipélagos. Existe dominância de sistemas de polinização por abelhas e pelo vento nas paisagens abertas do Campo Rupestre. Mas para espécies de plantas que são localmente restritas e têm prevalência de ocorrência em afloramentos rochosos isolados, por exemplo, a maioria dos polinizadores são espécies animais de médio e longo alcance, como abelhas grandes e beija-flores (MONTEIRO et al., 2021). Nesses ambientes, as espécies podem responder de maneiras distintas à fragmentação e aos atributos da paisagem, que podem ser utilizados como variáveis explicativas dos padrões encontrados. Os sapos, por exemplo, dependem de um ecossistema híbrido, no qual sua fase larval quase sempre depende de ambientes exclusivamente aquáticos. Espécies de girinos colonizam sobretudo ambientes lênticos. Portanto, a maioria dos anfíbios tem apenas corpos d'água e ambientes úmidos como possíveis unidades da paisagem para colonização. Mas podemos também estudar a microbiota associada à pele de uma determinada espécie de sapo,

por exemplo. Neste caso, aspectos relevantes da paisagem em microescala seriam as diferentes superfícies e estruturas morfológicas (ASSIS; BARRETO; NAVAS, 2017). A mesma abordagem poderia ser aplicada para estudos de paisagem de aves. Qual seria o impacto da instalação de hélices para a produção de energia eólica nas montanhas para a movimentação uma espécie de ave? E para as metacomunidades dos seus ectoparasitas? Em ambos os casos, podemos utilizar métricas de ecologia de paisagem, mas em diferentes escalas. É válido refletir que um mesmo objeto quando estudado na mesma escala, pode ser considerado como, por exemplo, uma “comunidade” ou “ecossistema” (METZGER, 2001).

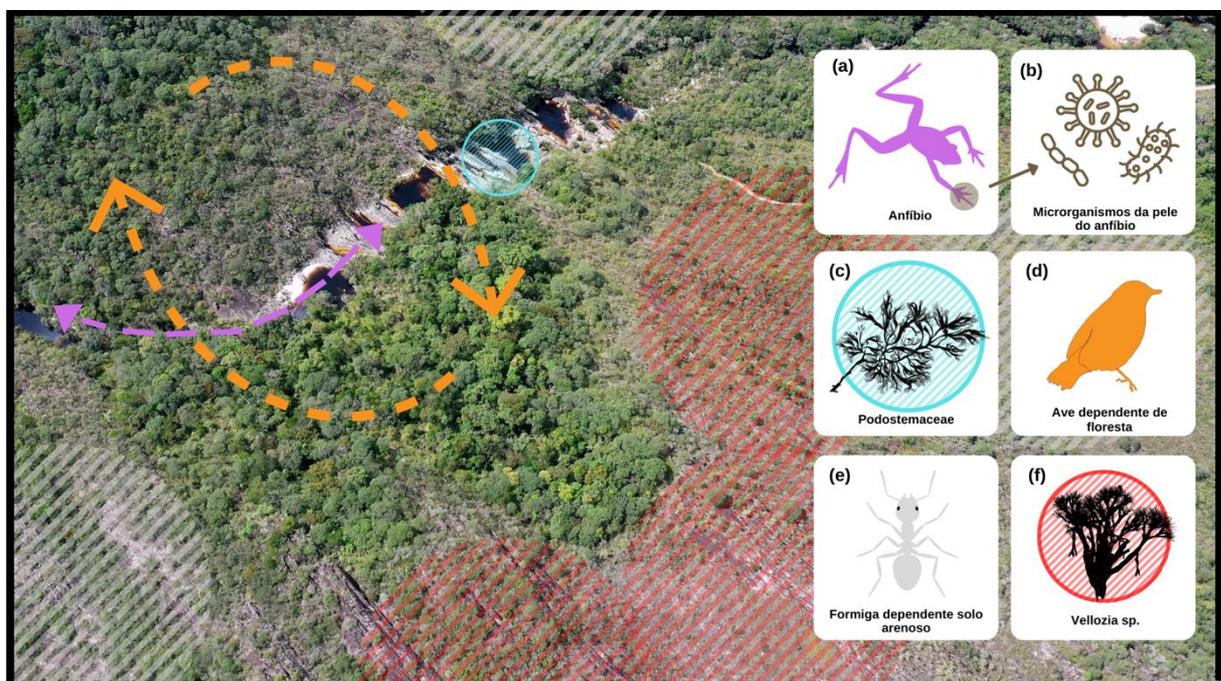


Figura 3. No ambiente heterogêneo dos Campos Rupestres, temos inúmeras possibilidades de estudo das métricas de paisagem influenciando na dinâmica das populações e comunidades biológicas. a: Anfíbio depende de ambientes úmidos; b: bactérias da pele do anfíbio procuram distintas estruturas morfológicas para colonização; c: Podostemaceae, família de planta encontrada tipicamente em ambientes lóticos rupestres; d: espécie de ave dependente de fragmentos de floresta; e: formiga hipotética que forrageia exclusivamente em ambientes com solo arenoso; f: Canela-de-ema (Velloziaceae) que tem distribuição preferencialmente restrita aos afloramentos rochosos. Foto de fundo: Ricardo Solar.

Estudos considerando múltiplas escalas em uma abordagem de ecologia de paisagens são raros para o Campo Rupestre. Grande parte dos estudos publicados foram realizados durante um projeto de Pesquisa Ecológica de Longa Duração no Campo Rupestre (Projeto PELD CRSC/CNPq), no qual pontos amostrais são permanentemente monitorados para diversos grupos taxonômicos em sete pontos distribuídos ao longo de um gradiente de elevação

de 800 a 1400 m na Serra do Cipó, estado de Minas Gerais (SILVEIRA et al., 2019). De modo geral, tanto os atributos inerentes de uma mancha (como, por exemplo, o tamanho de um fragmento, cobertura do dossel, densidade do sub-bosque, distância da floresta contínua, ...), quanto os elementos da paisagem (tais como conectividade, porcentagem de cada unidade de paisagem, complexidade da forma da mancha, etc) podem determinar a estrutura das comunidades biológicas. Em um desses trabalhos, Pereira e colaboradores (2017) descobriram que comunidades de borboletas que se alimentam de frutas são dependentes de efeitos locais (ou seja, atributos das manchas) e da paisagem (isolamento) em uma paisagem naturalmente fragmentada no Campo Rupestre. A riqueza de borboletas foi maior em ilhas florestais com maior abertura do dossel e menor cobertura de sub-bosque na estação seca, enquanto as métricas de paisagem tiveram pouco efeito na riqueza, mas forte influência na composição de espécies (PEREIRA et al., 2017). Vespas e abelhas também foram estudadas em uma abordagem de ecologia de paisagem (PERILLO et al., 2020). Nenhuma das métricas, exceto a distância da floresta contínua, pareceu ser um fator espacial importante para mudanças na composição de espécies de Aculeata nesse sistema.

Uma maneira de estudar a preferência à determinados atributos da paisagem é utilizar espécies especialistas de um ambiente específico como, por exemplo, espécies dependentes da floresta ou tolerantes à matriz. da Silva e colaboradores (2019) realizaram um estudo com este enfoque e encontraram que os atributos das manchas florestais e da paisagem tiveram pequenos efeitos gerais nas espécies de besouros rola-bosta. Mas quando separaram as espécies dependentes da floresta, estes valores influenciaram fortemente a riqueza, abundância e diversidade temporal dos besouros. Para formigas, grupo com uma menor capacidade de dispersão, espécies dependentes de floresta e generalistas responderam diferentemente às características das ilhas florestais e dos atributos da paisagem (BRANT et al., 2021). Os autores sugerem que a estrutura da paisagem parece atuar como um filtro espacial e os atributos das ilhas florestais como um filtro ambiental, que conjuntamente determinam a diversidade local e regional de formigas. A divisão em diferentes guildas também pode trazer relevantes aspectos da dinâmica de espécies. Insetos herbívoros foram estudados no mesmo ambiente e separados em sugadores de seiva, mastigadores de folhas e brocadores de caules (KUCHENBECKER et al., 2021). Os autores encontraram uma maior importância na variação temporal (sazonalidade) do que nas características da paisagem para a diversidade total de insetos.

4 MUDANÇAS ANTRÓPICAS NA PAISAGEM

A paisagem contemporânea da Terra é coberta por um mosaico de ambientes naturais e modificados pelo homem. Nosso impacto é tão evidente que pesquisadores sugerem que ingressamos na época geológica do Antropoceno (LEWIS; MASLIN, 2015). Novos ecossistemas resultantes da atividade humana têm surgido no Brasil, incorporando espécies exóticas e consolidando novas coberturas do solo que são distantes das características naturais históricas (NORONHA; FREITAS; SOLÓRZANO, 2022). Mudanças no uso da terra e uma consequente perda de habitat, gerando modificações na paisagem, é a principal causa da perda de biodiversidade no planeta. Essas pressões e a fragmentação das paisagens podem gerar um gargalo que promove perda de heterogeneidades. A homogeneização da paisagem seleciona sobretudo espécies resilientes e de ampla distribuição e exclui espécies raras, endêmicas e sensíveis a variações (MALHI et al., 2014).

Nos Campos Rupestres, a adição de diferentes habitats na paisagem localmente aumenta a heterogeneidade de ambientes, ampliando a riqueza regional de espécies de insetos galhadores (COELHO et al., 2018). A inclusão de pequenas paisagens com características diferentes é mais importante do que uma única grande e homogênea paisagem. O mesmo acontece com abelhas, vespas e formigas da Cordilheira do Espinhaço. A variação na riqueza e composição de espécies entre diferentes montanhas está fortemente associada ao gradiente elevacional, que apresentou variação climática mais forte do que o gradiente latitudinal (PERILLO et al., 2021). A temperatura pode variar mais em uma mesma montanha do que entre montanhas que estão distantes em mais de 800 quilômetros. Considerar que as espécies dos Campos Rupestres se comportam como metacomunidades e entender como espécies são dependentes de paisagens específicas se faz necessário.

Os ambientes montanhosos estão mudando rapidamente (SILVEIRA et al., 2019). A mineração, expansão urbana, o fogo, espécies invasoras, turismo predatório e o aquecimento global têm gerado a extinção de ambientes naturais (FERNANDES et al., 2018; COELHO et al., 2018). Em regiões montanhosas, as mudanças climáticas, somadas às pressões antrópicas, podem gerar ainda mais impacto na biodiversidade, já que espécies com distribuição restrita aos ambientes altimontanos não terão para onde migrar. Precisamos promover estratégias de conservação para toda a paisagem, incluindo as diferentes unidades dos Campos Rupestres, mantendo assim a heterogeneidade de habitats que sustenta suas metacomunidades altamente diversificadas (NEVES et al., 2021).

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Dr. José Wanderley Novato-Silva pelo convite e ao prof. Rogério Parentoni Martins pela indicação e pelas prosas acompanhadas de um bom vinho. Ao GSG pelas constantes discussões científicas. Agradeço ao prof. Ricardo Solar pela tutoria durante minha residência pós-doutoral e por ceder a foto que compõe a Figura 3. Ainda, agradeço ao DAAD e a Universidade de Münster pela minha bolsa de pós-doutorado.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. Summit surfaces in Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, p. 515-516, 2000.
- ALVES, R. J. V. et al. Circumscribing *campo rupestre* – megadiverse Brazilian rocky montane savanas. **Brazilian Journal of Biology**, v. 74, p. 355-362, 2014.
- ASSIS, A. B.; BARRETO, C. C.; NAVAS, C. A. Skin microbiota in frogs from the Brazilian Atlantic Forest: Species, forest type, and potential against pathogens. **PLoS ONE**, v. 12, n. 7, p. e0179628, 2017.
- BARBOSA, N. P. U.; FERNANDES, G. W.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A. A relict species restricted to a quartzitic mountain in tropical America: An example of microrefugium? **Acta Botanica Brasilica**, v. 29, n. 3, p. 299–309, 2015.
- BRANT, H. S. C. et al. Spatiotemporal Patterns of Ant Metacommunity in a Montane Forest Archipelago. **Neotropical Entomology**, v. 50, p. 886–898, 2021.
- CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y. (Orgs). **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais**. 1. ed. Belo Horizonte: 3i Editora, 2015, 552 p.
- CHAVES, A. V. et al. Biogeographic patterns, origin and speciation of the endemic birds from eastern Brazilian mountaintops: a review. **Systematics and Biodiversity**, v. 13, n. 1, p. 1-16, 2014.
- CHEN, P. Entity-Relationship Modeling: Historical Events, Future Trends, and Lessons Learned. In: Broy, M.; Denert, E. (eds) **Software Pioneers**. Berlim: Springer, 2002.
- COELHO M. S. et al. Species turnover drives β -diversity patterns across multiple spatial scales of plant-galling interactions in mountaintop grasslands. **PLoS ONE**, v. 13, n. 5, p. e0195565, 2018.
- COELHO, M. S. et al. Archipelago of montane forests surrounded by rupestrian grasslands: new insights and perspectives. In: FERNANDES, G. W. (Org.) **Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil**. 1. ed. New York: Springer, 2016. Cap. 7, p. 129-146.

- COSTA, F. V. et al. Ant fauna in megadiverse mountains: a checklist for the rocky grasslands. **Sociobiology**, v. 62 p. 228–245, 2015.
- COUTINHO, F. A.; MARTINS, R. P.; NEVES, A. C. O. Uma metafísica para a ecologia. **Argumentos**, v. 4, n 7, p. 111-118, 2012.
- DA SILVA, P. G. et al. Patch and landscape effects on forest-dependent dung beetles are masked by matrix-tolerant dung beetles in a mountaintop rainforest archipelago. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 1321–1331, 2019.
- ECHTERNACHT, L. et al. Areas of endemism in the Espinhaço Range in Minas Gerais, Brazil. **Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 206, p. 782–791, 2011.
- FAHRIG, L. Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. **Journal of Biogeography**, v. 40, p. 1649–1663, 2013.
- FAIRCLOUGH, G.; MØLLER, P. G. (Eds.) (2008). **Landscape as heritage: The Management and protection of Landscape in Europe**, a summary by the COST A27 project "LANDMARKS". (1 ed.) Institute of Geography, University of Berne. Geographica Bernensia No. G 79.
- FERNANDES, G. W. et al. Biodiversity and ecosystem services in the *Campo Rupestre*: A road map for the sustainability of the hottest Brazilian biodiversity hotspot. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 18, p. 213-222, 2020.
- FERNANDES, G. W. et al. Challenges for the conservation of vanishing megadiverse rupestrian grasslands. **Natureza & Conservação**, v. 12, n. 2, p. 162-165, 2014.
- FERNANDES, G. W. **Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil**. New York: Springer, 2016, 567 p.
- FIGUEIRA, J. E. C. et al. Fire in Rupestrian Grasslands: Plant Response and Management. In: FERNANDES, G. W. (Org.) **Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil**. 1. ed. New York: Springer, 2016. Cap. 18, p. 415–448.
- FOUILLOUX, C. A. et al. Pool choice in a vertical landscape: Tadpole-rearing site flexibility in phytotelm-breeding frogs. **Ecology and Evolution**, v. 11, p. 9021– 9038, 2021.
- GUREVITCH, J.; SCHEINER, S. M.; FOX, G. A. Ecologia de Paisagem. In: GUREVITCH, J.; SCHEINER, S. M.; FOX, G. A. **Ecologia Vegetal**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. Cap. 16, p. 369-388.
- HANSKI, I.; GILPIN, M. Metapopulation dynamics: brief history and conceptual domain. **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 42, p. 3-16, 1991.
- HOPPER, S. D.; SILVEIRA, F. A. O.; FIEDLER, P. L. Biodiversity hotspots and Ocbil theory. **Plant and Soil**, v. 403, n. 1-2, p. 167-216, 2016.
- HOWARD, Peter; THOMPSON, Ian; WATERTON, Emma. (eds.). **The Routledge Companion to Landscape Studies**. Routledge, 2013, p.490.
- HUFBAUER, R. A. et al. Three types of rescue can avert extinction in a changing environment. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, p. 10557–10562, 2015.

- HUMBOLDT, A. V. **Cosmos**: a sketch of a physical description of the universe (Cambridge Library Collection – Physical Sciences). Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- HUTCHINSON, G. E. Concluding Remarks. **Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology**, v. 22, p. 415-427, 1957.
- JACOBI, C. M. et al. Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. **Biodiversity and Conservation**, v. 16, p. 2185-2200, 2007.
- KUCHENBECKER, J. et al. Spatiotemporal distribution of herbivorous insects along always-green mountaintop forest islands. **Frontiers in Forest and Global Change**, v. 4, p. 709403, 2021.
- LAGE, L. B. **Paisagem como ligação entre a conservação do patrimônio e o planejamento territorial**: conservation through development. 2018. 473 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências, Belo Horizonte. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MMMD-B7JKQU/1/tese_laura.pdf>. Acesso em: 24 mai 2022.
- LARSEN, Cole D.; HARGREAVES, Anna L. Miniaturizing landscapes to understand species distributions. **Ecography**, v. 43, p. 1625–1638, 2020.
- LE STRADIC, S.; BUISSON, E.; FERNANDES, G. W. Vegetation composition and structure of some Neotropical mountain grasslands in Brazil. **Journal of Mountain Science**, v. 12, p. 864–877, 2015.
- LEIBOLD M. A. et al. The metacommunity concept: A framework for multi-scale community ecology. **Ecology Letters**, v. 7, p. 601–613, 2004.
- LEITE, F. S. F.; ETEROVICK, P. C.; JUNCÁ F. A. Status do conhecimento, endemismo e conservação de anfíbios anuros da Cadeia do Espinhaço, Brasil. **Megadiversidade**, v. 4, n. 1-2, p. 158–176, 2008.
- LEVINS, R. Some Demographic and Genetic Consequences of Environmental Heterogeneity for Biological Control. **Bulletin of the Entomological Society of America**, v. 15, p. 237-240, 1969.
- LEWIS, S.; MASLIN, M. Defining the Anthropocene. **Nature**, v. 519, p. 171–180, 2015.
- MACARTHUR R. H., WILSON, E. O. **The Theory of Island Biogeography**. 1. ed. Princeton: Princeton University Press, 1967.
- MALHI Y. et al. Tropical forests in the Anthropocene. **Annual Reviews in Environment and Resources**, v. 39, p. 125-159, 2014.
- MARTINS, R. P. Conceito Ecosistema. **Blog Ciência em Ação**, Belo Horizonte, 28 mai. 2022. Disponível em: <<https://biologiadaconservacao.com.br/cienciaemacao-conceito-ecossistema>>. Acesso em: 29 mai. 2022.
- MCGARIGAL, K.; CUSHMAN, S. A.; ENE, E. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. 2012. Programa de software de computador produzido pelos autores da Universidade de Massachusetts, Amherst. Disponível em:

<<https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5888ed89e4b05ccb964c396e>>. Acesso em 02 jun. 2022.

METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotropica**, v. 1, n. 1–2, p. 1–9, 2001.

MILLÁN, M. C. Science, nature and landscape in Alexander Von Humboldt. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, v. 64, p. 415–417, 2014.

MONTEIRO, I. et al. Disturbance-modulated symbioses in termitophily. **Ecology and Evolution**, v. 7, p. 10829–10838, 2017.

MONTEIRO B. L. et al. Pollination in the campo rupestre: a test of hypothesis for an ancient tropical mountain vegetation. **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 133, p. 512–530, 2021.

MONY, C.; BOHANNAN, B. J. M.; PEAY, K.; VANDENKOORNHUYSE, P.; LEIBOLD, M. A. (eds.). **Microbial Landscape Ecology: Highlights on the Invisible Corridors**. Lausanne: Frontiers Media AS, 2021.

MOTA, G. S. et al. Changes in species composition, vegetation structure, and life forms along an altitudinal gradient of rupestrian grasslands in south-eastern Brazil. **Flora**, v. 238, p. 32–42, 2018.

NEVES FS, et al. Habitat generalists drive nestedness in a tropical mountaintop insect metacommunity. **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 133, p. 577–586, 2021.

NEWMAN, Erica A.; KENNEDY, Maureen C.; FALK, Donald A.; MCKENZIE, Donald. Scaling and Complexity in Landscape Ecology. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 7, n. 293, ago. 2019.

NORONHA, F.; FREITAS, M. M.; SOLÓRZANO, A. Os Novos Ecossistemas do “Sertão Carioca”: Transformação da Paisagem e História de Uso da Terra na Bacia do Rio Piabas (1968-2018), Rio de Janeiro. **Sociedade e Natureza**, v.34, p. e64183, 2022.

OLIVEIRA A. I. L.; LOBÃO, J. S. B.; ARAÚJO, A. M. Revisitando o conceito de paisagem para pensar a prática de ensino: aprendizagem de geografia na contemporaneidade. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 19, n. 68, p. 286–295, 2018.

OSWALD, C. B. et al. Colonization rather than fragmentation explains the geographical distribution and diversification of treefrogs endemic to Brazilian shield sky islands. **Journal of Biogeography**, v. 49, p. 682–698, 2022.

PEREIRA, G. C. N. et al. Diversity of fruit-feeding butterflies in a mountaintop archipelago of rainforest. **PLoS One**, v. 12, p. e0180007, 2017.

PERILLO, L. N. et al. Disentangling the effects of latitudinal and elevational gradients on bee, wasp, and ant diversity in an ancient neotropical mountain range. **Journal of Biogeography**, v. 48, p. 1564–1578, 2021.

PERILLO, L. N. et al. Patterns of diversity in a metacommunity of bees and wasps of relictual mountainous forest fragments. **Journal of Insect Conservation**, v. 24, p. 17–34. 2020.

RAPINI, A. et al. A flora dos campos rupestres da Cadeia do Espinhaço. **Megadiversidade**, v. 4, p. 15–23, 2008.

RESCHER, Nicholas. **Process Metaphysics: An Introduction to Process Philosophy**. 1 ed. Nova Iorque: State University of New York Press, 224 p., 1996.

SALVIO, Vanessa Linke. **Paisagens dos sítios de pintura rupestre da região de Diamantina -MG**. 2008. 186 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências, Belo Horizonte.

SCHAEFER, C. E. G. R. et al. The Physical Environment of Rupestrian Grasslands (*Campos Rupestres*) in Brazil: Geological, Geomorphological and Pedological Characteristics, and Interplays. In: FERNANDES, G. W. (Org.). **Ecology and Conservation of Mountaintop Grasslands in Brazil**. 1. ed. New York: Springer, 2016. Cap. 2, p. 15-54.

SILVEIRA, Fernando A. O. et al. Tropical mountains as natural laboratories to study global changes: A long-term ecological research project in a megadiverse biodiversity hotspot. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 38, p. 64–73, 2019.

SILVEIRA, Fernando A. O. et al. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered *campo rupestre*: a neglected conservation priority. **Plant and Soil**, v. 403, p. 129–152, 2016.

SOBERÓN, J.; PETERSON, A. T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. **Biodiversity Informatics**, v. 2, p. 1–10, 2005.

STRACHULSKI, J. O percurso do conceito de paisagem na ciência geográfica e perspectivas atuais. **Revista Sapiência: sociedade, saberes e práticas educacionais – UEG/Câmpus de Iporá**, v.4, n. 2, p. 03-33, jul/dez 2015.

TROLL, C. Landscape ecology (geo-ecology) and biogeocenology: a terminological study. **Geoforum**, v. 8, p. 43-46, 1971.

VASCONCELOS, T. N. et al. Fast diversification through a mosaic of evolutionary histories characterizes the endemic flora of ancient Neotropical mountains. **Proceedings Biological Sciences**, v. 287, n. 1923, 20192933, 2020.

VINCENT, R. C.; MEGURO, M. Influence of soil properties on the abundance of plant species in ferruginous rocky soils vegetation, southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 31, n. 3, p.377-388, jul.-set. 2008.

VINCENT, R. C.; JACOBI, C. M.; ANTONINI, Y. Diversidade na adversidade. **Ciência Hoje**, v. 31, p. 64-67, 2002.

WIENS, J. A. Spatial Scaling in Ecology. **Functional Ecology**, v. 3, n. 4, p. 385-397, 1989.

WIENS, J. A.; MILNE, B. T. Scaling of 'landscapes' in landscape ecology from a beetle's perspective. **Landscape Ecology**, v. 3, n. 2, p. 87-96, 1989.

WIENS, J. A. et al. Ecological mechanisms and landscape ecology. **Oikos**, v. 66, p. 369–380, 1993.

WULF, Andrea. **A invenção da natureza: A vida e as descobertas de Alexander Von Humboldt**. 1. ed. São Paulo: Editora Planeta, 2016, 587 p.