# Introdução

As mudanças climáticas estão alterando os regimes de temperatura e pluviosidade global, impactando a fenologia, o comportamento e a distribuição geográfica das espécies (IPCC 2022). As espécies têm sofrido mudanças nas bordas das suas distribuições para localidades mais temperadas e de maior altitude (Lemes, Priscila et al. 2014, Abreu-Jardim, Tatianne P.F. et al. 2021). Essas mudanças nas distribuições geográficas modificam a composição de espécies das comunidades ecológicas, causando disrupção de interações inter-específicas e distribuição de atributos funcionais, comprometendo o provimento, regulação e suporte de funções, estrutura e dinâmica ecossistêmica ((**montoya\_raffaelli\_2010?**)).

O impacto das mudanças climáticas não é uniforme ao longo do globo. A vulnerabilidade das espécies depende das suas exposições e sensibilidades às mudanças ambientais [Williams, Stephen E. et al. (2008); Folden]. A exposição é caracterizada pela forma como as mudanças globais, regionais e locais atuam diretamente nos organismos pela interação entre variáveis climáticas, bióticas, pedológicas, hidrológicas e topográficas, na determinação das condições microclimáticas e dos habitats onde as espécies vivem. Por outro lado, a sensibilidade depende da plasticidade fisiológica, morfológica e comportamental das espécies, sua adaptação às novas condições ambientais e capacidade de dispersar para áreas adequadas ambientalmente. Dessa forma, dependendo do grau de exposição, as espécies podem continuar nas suas localidades ou buscar áreas adequadas, dada a velocidade com que o clima muda localmente e regionalmente (Loarie, Scott R. et al. 2009). Locais com alta velocidade climática possuem alta taxa de mudança local ou baixa diferença climática em relação ao entorno. Nesse cenário, as espécies precisam se locomover por maiores distâncias para encontrarem áreas adequadas. Locais com baixa velocidade climática possuem baixa mudança climática ao longo do tempo ou alta variabilidade climática no entorno, possibilitando a manutenção na localidade ou a busca por regiões adequadas em localidades próximas. Assim, as espécies necessitam de uma rede de localidades não somente climaticamente adequadas, como também com baixa resistência à movimentação dado o uso e cobertura do solo.

As paisagens naturais têm sido severamente degradadas pela mudança no uso e cobertura do solo causada pela atividade antrópica ((**fao\_coppus\_2023?**); citações). A perda e fragmentação de habitat é uma das principais causas de ameaça de extinção das espécies (**pardini\_et\_al\_2017?**), tanto por reduzir a capacidade de suporte populacional quanto por diminuir a permeabilidade e alterar as dinâmicas metapopulacionais, o fluxo gênico e a riqueza das comunidades (**chase\_2020?**). Além disso, a perda e fragmentação de habitat também reduz a capacidade das espécies de se movimentarem na paisagem na busca por condições climáticas adequadas, aumentando a velocidade climática nas paisagens mais degradadas. Portanto, estratégias adequadas de conservação dependem de abordagens integrativas que considerem esses efeitos múltiplos, e sinérgicos, das mudanças globais sobre a distribuição das espécies (Sirami et al 2016).

Os estudos sobre os impactos das mudanças climáticas na distribuição da biodiversidade tem como base modelos que combinam informações sobre a distribuição das espécies e dados de projeções climáticas para diferentes períodos de tempo. Essas projeções climáticas utilizam modelos globais e regionais, possibilitando a identificação de áreas mais vulneráveis, refúgios climáticos e a projeção dos impactos futuros (citação). No entanto, os modelos climáticos fornecem dados em escalas regionais ou como interpolações em resoluções mais finas (Lima-Ribeiro, Matheus S et al. 2015, Fick e Hijmans 2017, Karger, Dirk Nikolaus et al. 2017), limitando o diagnóstico e desenvolvimento de estratégias de mitigação em escalas mais locais, onde as ações devem ser desenvolvidas efetivamente. Mesmo modelos microclimáticos, desenvolvidos para modelar mudanças em variáveis locais, são fornecidos globalmente em escalas regionais (Kearney, Michael R. et al. 2014). Uma alternativa aos modelos globais e regionais é a utilização de séries temporais de dados climáticos derivados de sensoriamento remoto orbital (Hulley, G. e Hook, S. 2018) ou estações metereológicas (Xavier et al. 2022). Nesse caso, apesar dos dados de longa duração possuírem escalas mais regionais (> 1km²), eles fornecem variabilidade de informação nessa escala, o que não é fornecido pelas interpolações dos modelos climáticos. Por outro lado, esses dados não possuem projeções para o clima futuro. Uma terceira abordagem, complementar aos modelos climáticos, é a utilização da topografia, geodiversidade e aspectos fisiográficos (Anderson, Mark G. et al. 2014, Lawler, Joshua J. et al. 2015, Theobald et al. 2015) para diagnosticar, mapear e desenvolver soluções para as mudanças climáticas.

A geodiversidade da paisagem, caracterizada pelo conjunto de variáveis abióticas da superfície e subsolo terrestre (ex. topografia, geologia, pedologia e hidrologia), tende a ter baixa taxa de mudança no intervalo de tempo factível para ações de mitigação das mudanças climáticas. Essas variáveis são componentes dos fatores determinantes de microclimas locais, como por exemplo a superfície que mais recebe radiação solar, as posições no relevo mais expostas a ação de ventos, o direcionamento de ventos frios, o acúmulo de umidade e retenção de água no solo. A interação entre a atmosfera e a topografia resulta em topoclimas, que tendem a ser desconectados do clima regional. Os locais onde o topoclima permite a manutenção das características microclimáticas, independente das mudanças regionalmente, têm sido definidos como locais potenciais para refúgios microclimáticos. Além disso, locais com maior complexidade topográfica e amplitude altitudinal proporcionam maior variabilidade de condições ambientais para as espécies. O potencial para atuar como refúgio microclimático e a maior variabilidade microclimática no entorno reduz a velocidade climática localmente.

O entendimento dos impactos das mudanças climáticas localmente necessita da compreensão dos seus impactos nas dimensões de biodiversidade, clima e geodiversidade, uma vez que todas essas variáveis se retroalimentam. Locais com maior geodiversidade são potencialmente mais resilientes às mudanças climáticas regionais tanto por amenizarem as mudanças microclimáticas locais, devido ao descolamento do topoclima com o clima regional, quanto pela disponibilidade de maior variabilidade microclimática. Além disso, locais com maior geodiversidade têm sido demonstrados com potencial de suportarem maior biodiversidade, em diferentes escalas espaciais (Tukiainen et al. 2018, Vernham et al. 2023). Portanto, a geodiversidade tem surgido como uma alternativa para o desenvolvimento de estratégias de mitigação das mudanças climáticas, sobretudo pelos avanços teóricos e operacionais, como a maior disponibilidade de informações acessíveis em escalas espaciais finas. Essa abordagem tem sido classificada como conservar o palco da natureza (do inglês **Conserving nature’s stage**), que é onde os atores da biodiversidade e as interações operam. A proposta é que a composição das comunidades muda ao longo do tempo, mas a manutenção das características abióticas que promovem e mantém a biodiversidade permite a promoção da diversidade biológica, mesmo que os componentes originais se modifiquem.

O primeiro mapeamento de áreas com potencialmente resilientes às mudanças climáticas dada a sua geodiversidade foi para a América do Norte (citação). Nessa proposta, áreas resilientes são definidas como aquelas com alta diversidade de condições abióticas superficiais e do subsolo, que possuem baixa degradação ambiental e são conectadas na paisagem (citação). Portanto, áreas resilientes teriam alta heterogeneidade de variáveis abióticas na paisagem e alta conectividade entre as manchas de habitat. A partir desse mapeamento, propusemos uma adaptação à metodologia utilizada anteriormente, de modo a aplicá-la para o contexto dos biomas brasileiros e identificar áreas resilientes a mudanças do clima para uma região tropical.

Abreu-Jardim, Tatianne P.F., Jardim, Lucas, Ballesteros-Mejia, Liliana, Maciel, Natan M., e Collevatti, Rosane G. 2021. [Predicting impacts of global climatic change on genetic and phylogeographical diversity of a Neotropical treefrog](https://doi.org/10.1111/ddi.13299). Divcersity and Distribution 27:1519–1535.

Anderson, Mark G., Clark, Melissa, e Sheldon, Arlene Olivero. 2014. [Estimating climate resilience for conservation across geophysical settings](https://doi.org/10.1111/cobi.12272). Conservation Biology 28:959–970.

Fick, S. E., e R. J. Hijmans. 2017. [WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas](https://doi.org/10.1002/joc.5086). International Journal of Climatology 37:4302–4315.

Hulley, G., e Hook, S. 2018. [VIIRS/NPP Land Surface Temperature and Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid Day V001](https://doi.org/10.5067/VIIRS/VNP21A1D.001). NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center.

IPCC. 2022. [Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]](https://10.1017/9781009325844). Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York, NY, USA.

Karger, Dirk Nikolaus, Conrad, Olaf, Böhner, Jürgen, Kawohl, Tobias, Kreft, Holger, Soria-Auza, Rodrigo Wilber, Zimmermann, Niklaus E., Linder, H. Peter, e Kessler, Michael. 2017. [Climatologies at high resolution for the earth’s land surface areas](https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122). Scientific Data 4:170122.

Kearney, Michael R., Isaac, Andrew P., e Porter, Warren P. 2014. [Microclim: Global estimates of hourly microclimate based on long-term monthly climate averages](https://doi.org/10.1038/sdata.2014.6). Scientific Data 1:140006.

Lawler, Joshua J., Ackerly, David D., Albano, Christine M., Anderson, Mark G., Dobrowski, Solomon Z., Gill, Jacquelyn L., Heller, Nicole E., Pressey, Robert L., Sanderson, Eric W., e Weiss, Stuart B. 2015. [The theory behind, and the challenges of, conserving nature’s stage in a time of rapid change](https://doi.org/10.1111/cobi.12505). Conservation Biology 29:618–629.

Lemes, Priscila, Melo, Adriano Sanches, e Loyola, Rafael Dias. 2014. [Climate change threatens protected areas of the Atlantic Forest](https://doi.org/10.1007/s10531-013-0605-2). Biodiversity and Conservation 23:357–368.

Lima-Ribeiro, Matheus S, Varela, Sara, González-Hernández, Javier, de Oliveira, Guilherme, Diniz-Filho, José Alexandre F, e Terribile, Levi Carina. 2015. [Ecoclimate : a Database of Climate Data From Multiple Models for Past , Present , and Future for Macroecologists and Biogeographers](https://doi.org/10.17161/bi.v10i0.4955). Biodiversity Informatics 10:1–21.

Loarie, Scott R., Duffy, Philip B., Hamilton, Healy, Asner, Gregory P., Field, Christopher B., e Ackerly, David D. 2009. [The velocity of climate change](https://doi.org/10.1038/nature08649). Nature 462:1052–1055.

Theobald, D. M., D. Harrison-Atlas, W. B. Monahan, e C. M. Albano. 2015. [Ecologically-Relevant Maps of Landforms and Physiographic Diversity for Climate Adaptation Planning](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143619). PLOS ONE 10:e0143619.

Williams, Stephen E., Shoo, Luke P., Isaac, Joanne L., Hoffmann, Ary A., e Langham, Gary. 2008. [Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change.](https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060325) PLoS biology 6:e325.

Xavier, A. C., B. R. Scanlon, C. W. King, e A. I. Alves. 2022. [New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)](https://doi.org/10.1002/joc.7731). International Journal of Climatology 42:8390–8404.