



Caracterização climática presente e futura da Bacia Hidrográfica do Rio Doce

Climatic Characterization of the Present and Future of the Doce River Basin

Marinez Ferreira de Siqueira^{1,2,4*}, Daphne Spier², Bruno Moreira Carvalho², Stella Mata¹, Kele Rocha Firmiano³

¹ Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro (IP-JBRJ), Rua Pacheco Leão, 915, Jardim Botânico, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 22460-030.
marinez.siqueira1@gmail.com, Orcid: 0000-0002-6869-0293, stella.mdlr@gmail.com. Orcid: 0000-0002-1178-5283

² Instituto Nacional da Mata Atlântica (INMA), Av. José Ruschi, 4, Centro, Santa Teresa, Espírito Santo, Brasil, CEP: 29650-000,
brunomc.eco@gmail.com, Orcid: 0000-0002-0009-5770, daphnespier@gmail.com, Orcid: 0000-0003-4253-2171

³ Rocha Firmiano Serviços Socioambientais Ltda, Rua Pitangui, 732, bairro Lagoinha, Belo Horizonte MG. Cep 31110-422

⁴ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Biologia. R. Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22451-900.

*autor correspondente:
marinez@jbrj.gov.br

Recebido: 25/08/2025
Aceito: 23/10/2025

Resumo

As mudanças climáticas globais e os impactos locais de grandes empreendimentos, como o rompimento da barragem de Fundão em 2015, representam ameaças significativas à biodiversidade e aos serviços ecossistêmicos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD). A restauração ecológica na bacia requer o entendimento das dinâmicas climáticas atuais e futuras, fundamentais para a seleção de espécies, monitoramento e planejamento de ações adaptativas. Neste estudo, foi realizada a caracterização climática presente e futura da BHRD, com o objetivo de identificar os modelos de circulação geral (GCMs) que melhor se ajustam às condições climáticas observadas da bacia, de forma a subsidiar a geração de modelos de nicho ecológico com maior precisão e acurácia. Foram analisados dados históricos de 21 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e de oito GCMs. As análises estatísticas indicaram que os modelos MPI, MRI e CNRM apresentaram maior correlação com os dados observados. Dentre esses, o modelo MPI foi selecionado por apresentar o melhor ajuste. A partir deste GCM foram projetadas as mudanças climáticas previstas para os cenários SSP1-2.6 (otimista), SSP3-7.0 (intermediário) e SSP5-8.5 (pessimista), revelando aumentos de temperatura média entre +1 °C e +3 °C nas regiões norte e oeste da bacia, além de reduções de até 150 mm/ano na precipitação nas áreas centrais e norte projetadas para 2041-2070. Estes padrões projetados de mudança climática reforçam a necessidade de integrar variáveis climáticas nas estratégias de restauração ecológica visando considerar a distribuição do ótimo climático ocupado pela espécie dentro da Bacia como um atributo a mais a ser considerado a fim de orientar a seleção das espécies com maior potencial de sucesso em processos de restauração na BHRD.

Palavras-chave: clima, mudanças climáticas, modelagem climática, restauração ecológica, Mata Atlântica

Abstract

Global climate change and the local impacts of major developments, such as the 2015 Fundão dam collapse, represent significant threats to biodiversity and ecosystem services in the Doce River Basin (BHRD). Ecological restoration in the basin requires an understanding of current and future climate dynamics, which are fundamental for selecting

species, monitoring their populations, and planning adaptive actions. In this study, we characterized the present and future climate of the BHRD to identify the General Circulation Models (GCMs) that best fit the basin's observed climatic conditions, thereby supporting the development of more precise and accurate ecological niche models. Historical data from 21 meteorological stations of the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET) and eight GCMs were analyzed. Statistical analyses indicated that the MPI, MRI, and CNRM models showed the highest correlation with the observed data, with the MPI model being selected for its superior performance. Based on this GCM, climate projections were generated for the SSP1-2.6 (optimistic), SSP3-7.0 (intermediate), and SSP5-8.5 (pessimistic) scenarios, revealing increases in mean temperature ranging from +1 °C to +3 °C in the northern and western regions of the basin, as well as reductions of up to 150 mm per year in precipitation in the central and northern areas projected for 2041–2070. These projected patterns of climate change reinforce the need to integrate climatic variables into ecological restoration strategies, considering the distribution of each species' climatic optimum within the basin as an additional attribute to guide species selection and enhance the likelihood of successful restoration outcomes in the BHRD.

Keywords: climate, climate change, climate modeling, ecological restoration, Atlantic Forest

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais representam um dos principais desafios para a conservação da biodiversidade e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Alterações nos regimes de temperatura e precipitação afetam diretamente a distribuição geográfica das espécies de plantas, comprometem processos ecológicos fundamentais e colocam em risco serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação climática, a manutenção do ciclo hidrológico e o fornecimento de água e alimentos (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021).

Nesse contexto, os Modelos de Circulação Geral (General Circulation Models – GCMs) são amplamente utilizados para simular condições atmosféricas passadas, presentes e futuras. Estes modelos estimam e projetam variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, para toda a superfície terrestre em diferentes cenários de

emissão, cada um baseado em premissas específicas sobre o comportamento futuro do sistema climático (Flato et al., 2013; IPCC, 2021).

A escolha adequada do modelo e do tipo de dado climático é uma etapa crítica na avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade, especialmente em estudos de modelagem de distribuição de espécies (Araújo et al., 2005; Thuiller, 2004). Devido às variações entre os GCMs na forma de representar o clima, sua seleção deve considerar o desempenho regional e a finalidade específica da análise.

Além dos efeitos globais do clima, a Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), com cerca de 83.400 km², localizada nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, foi profundamente impactada por um desastre ambiental de grande magnitude: o rompimento da barragem de Fundão, em 2015, no município de Mariana/MG (doravante, rompimento). O rompimento liberou aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos

de rejeitos de mineração, comprometendo a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos e terrestres da bacia, com potenciais danos irreversíveis à biodiversidade local (Wanderley et al., 2016).

A restauração ecológica — ativa ou passiva — constitui uma medida essencial para recuperar a biodiversidade e a funcionalidade ecológica das áreas afetadas da BHRD, que foram fortemente impactadas pelo rompimento da barragem de Fundão em 2015 (Pires et al., 2017).

No entanto, a efetividade dessas ações de restauração depende do entendimento das condições ambientais locais e das tendências climáticas futuras que moldam e moldarão os ecossistemas da região. Neste contexto, torna-se fundamental compreender as dinâmicas climáticas presentes e futuras da BHRD. Essa caracterização permite identificar áreas mais vulneráveis a aumentos de temperatura e reduções de precipitação, subsidiando o planejamento, através da seleção de espécies e de práticas de restauração mais eficientes e adaptadas às novas condições ambientais.

Assim, este estudo teve como objetivos caracterizar o clima atual e futuro da BHRD, avaliar sua variabilidade e identificar os modelos climáticos que melhor representam suas dinâmicas atmosféricas, de modo a fornecer subsídios técnicos para a seleção de espécies e a definição de estratégias de restauração ecológica que contribuam para a adaptação e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na região.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A BHRD está localizada na região Sudeste do Brasil e pertence à região hidrográfica do Atlântico Sudeste (Figura 1). Suas nascentes se originam nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço e desaguam no Oceano Atlântico, em Regência (ES). O relevo varia de áreas montanhosas no oeste a planícies costeiras no leste. O clima predominante, segundo Köppen (1936), é do tipo tropical úmido, com verões quentes e chuvosos e invernos secos. A temperatura média anual é de cerca de 20 °C, com precipitação variando até 1.500 mm/ano.

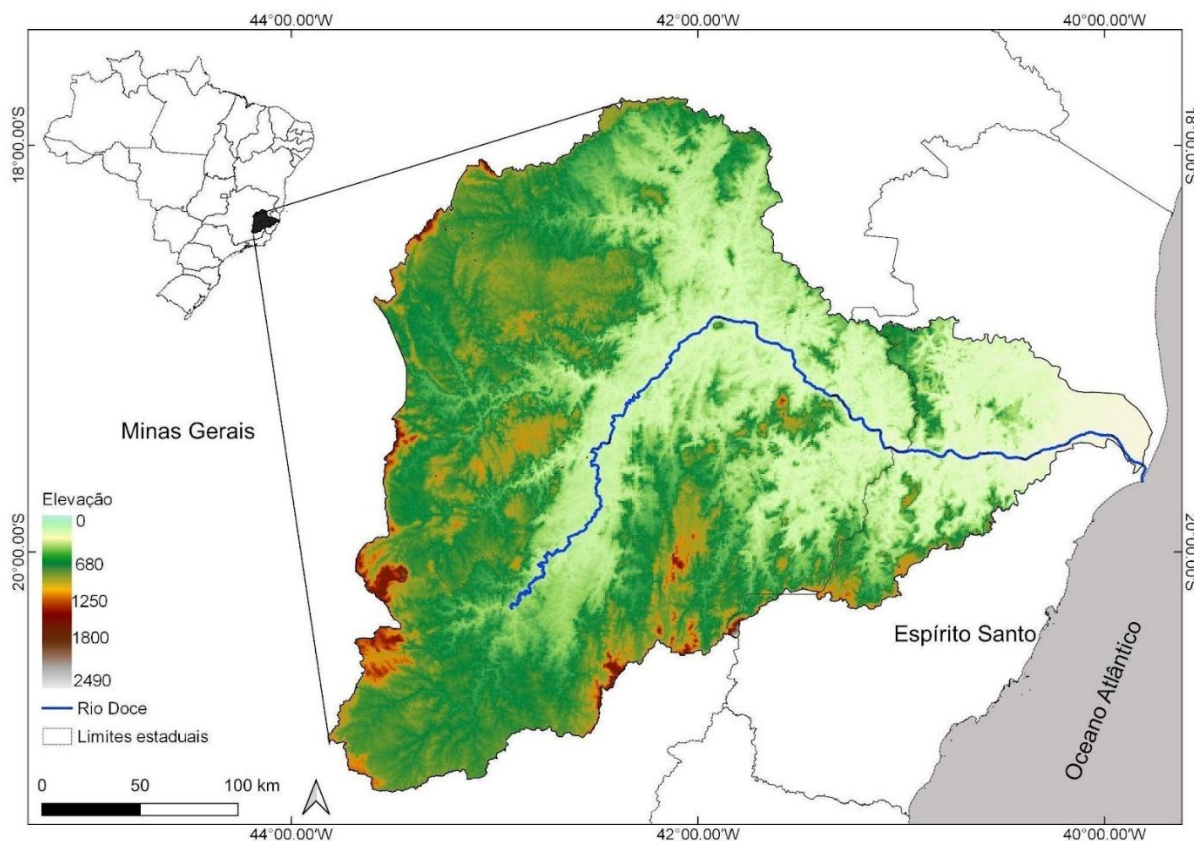


FIGURA 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), abrangendo os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, no sudeste do Brasil.

Coleta e processamento de dados climáticos

Estações meteorológicas

Foram utilizados dados de 21 estações meteorológicas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas dentro e em distâncias de até 5 km dos limites da BHRD. As variáveis analisadas foram precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima. Esses dados estão disponíveis para o período de 1970 a 2013, no entanto, para este estudo foram utilizados os dados entre 1981 e 2010 por estarem disponíveis mensalmente de forma mais completa que os demais anos. Esses dados serviram como base observacional para comparação e avaliação do desempenho dos modelos climáticos globais. As séries temporais mensais dessas estações meteorológicas permitiram capturar a variabilidade climática regional necessária para as comparações com os modelos climáticos globais.

Foram também utilizados dados da base histórica do clima presente (1970-2000) do

Worldclim versão 2.1 (worldclim.org/data/worldclim21.html) para funcionar como uma base comparativa entre os modelos de circulação global projetados (oriundos da base do Ecoclimate) e os dados das estações climáticas do INMET.

Modelos Climáticos Globais

Foram utilizados dados mensais de oito modelos climáticos globais (GCMs em inglês) disponíveis na base EcoClimate (Lima-Ribeiro et al., 2015; Varela et al., 2015) cujos dados do presente são representados por valores de 1950 - 1999, são eles: National Center for Atmospheric Research - USA (CCSM); Centre National de Recherches Meteorologiques - EU/França (CNRM); National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics - China (FGOALS); Goddard Institute for Space Studies - USA (GISS); Institut Pierre Simon Laplace -

France (IPSL); National Institute for Environmental Studies (MIROC); and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology - Japan; Max Planck Institute for Meteorology - Germany (MPI); e Meteorological Research Institute Global Climate Model – Japan (MRI). Os valores climáticos para a região da BHRD foram extraídos para os pixels correspondentes às localizações das estações meteorológicas. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio da comparação entre os dados das 21 Estações Meteorológicas da região da BHRD, a base do Worldclim versão 2.1 série histórica do presente e os modelos de circulação global futura projetados.

Cenários de mudanças climáticas (SSPs)

Para a projeção das condições climáticas futuras, foram considerados três cenários socioeconômicos de emissão de gases de efeito estufa, denominados Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), conforme definidos no Sixth Assessment Report do IPCC (2021) e detalhados em Meinshausen et al. (2020). Os dados utilizados foram referentes às projeções de 2041-2070, por considerar próximo o suficiente para ter influência no ciclo reprodutivo das árvores que estão sendo plantadas hoje nos projetos de restauração da BHRD.

Esses cenários representam trajetórias alternativas de desenvolvimento global que influenciam diretamente as emissões futuras de CO₂ e, conseqüentemente, as mudanças climáticas, são eles:

SSP1-2.6 (Otimista): caracteriza um mundo orientado para a sustentabilidade, com baixa desigualdade, rápida transição energética e emissões reduzidas, levando a um aquecimento global limitado (~1,8 °C até 2100).

SSP3-7.0 (Intermediário): representa um cenário fragmentado, com desigualdade socioeconômica elevada, crescimento populacional acentuado e cooperação

internacional limitada, resultando em emissões moderadas e aquecimento mais intenso (~2,8 °C até 2100).

SSP5-8.5 (Pessimista): descreve um futuro de alta dependência de combustíveis fósseis e crescimento econômico baseado em carbono, com emissões elevadas e aquecimento acentuado (~4,4 °C até 2100).

A escolha desses três cenários buscou abranger a variabilidade plausível das condições futuras, permitindo estimar o impacto de diferentes trajetórias de emissão sobre as variáveis climáticas da BHRD e apoiar o planejamento de ações de restauração ecológica sob distintos contextos de aquecimento global.

Análise estatística

As correlações de Pearson foram calculadas entre os valores observados nas estações meteorológicas e os valores modelados pelos GCMs para precipitação, temperatura máxima e mínima. Correlações com valor de p inferior a 0,05 foram consideradas estatisticamente significativas, indicando bom ajuste entre os dados modelados e observados. Todas as análises foram conduzidas no ambiente estatístico R (versão 4.1) e RStudio (versão 1.3.959), com scripts abertos e disponíveis no repositório do projeto: <https://github.com/Projeto-BHRD-INMA/clima>.

O modelo GCM cuja série histórica (dados do presente) melhor se ajustou aos dados observados pelas estações meteorológicas foi selecionado para calcular as projeções climáticas futuras para a região da BHRD.

Resultados

As médias anuais de temperatura e precipitação registradas pelas estações meteorológicas do INMET evidenciaram a predominância de um clima tropical úmido na BHRD, com estação seca nos meses de inverno

(Figura 2). A análise espacial dos dados do presente indicou que as regiões de maior altitude apresentaram os maiores totais anuais de precipitação e as menores temperaturas médias, enquanto os fundos de vales e áreas deprimidas registraram menor precipitação e maiores

temperaturas (Figuras 3A e 3B). Observam-se a concentração das chuvas no verão (novembro a março) e a redução acentuada na estação seca (maio a setembro), enquanto a temperatura apresenta menor variabilidade sazonal.

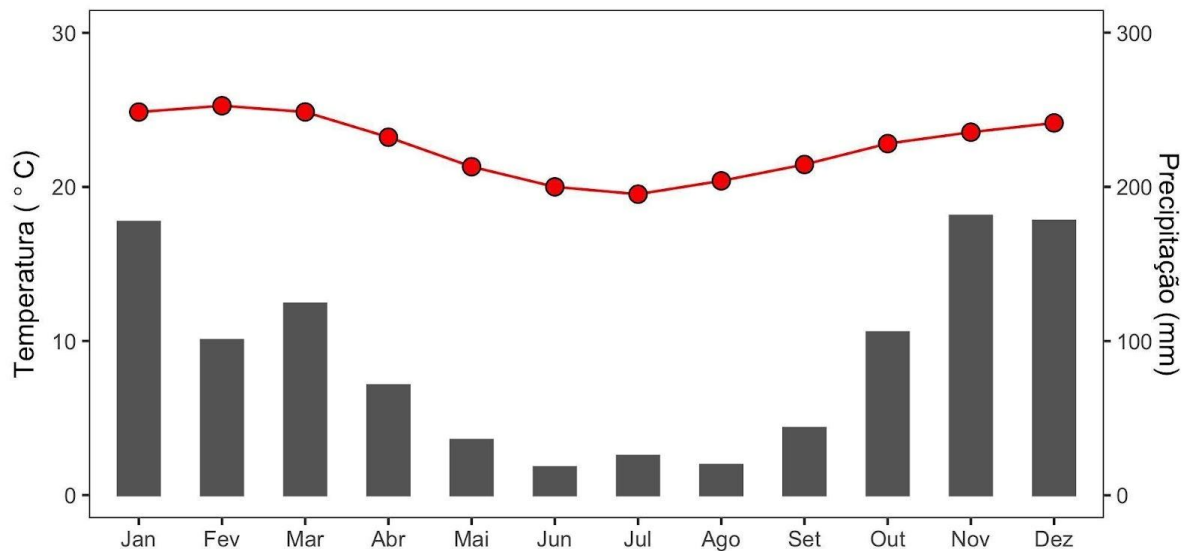


FIGURA 2: Climatologia mensal da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) para o período de referência (1981–2010). As barras representam a precipitação média mensal (mm) e a linha com marcadores vermelhos indica a variação da temperatura média mensal (°C).

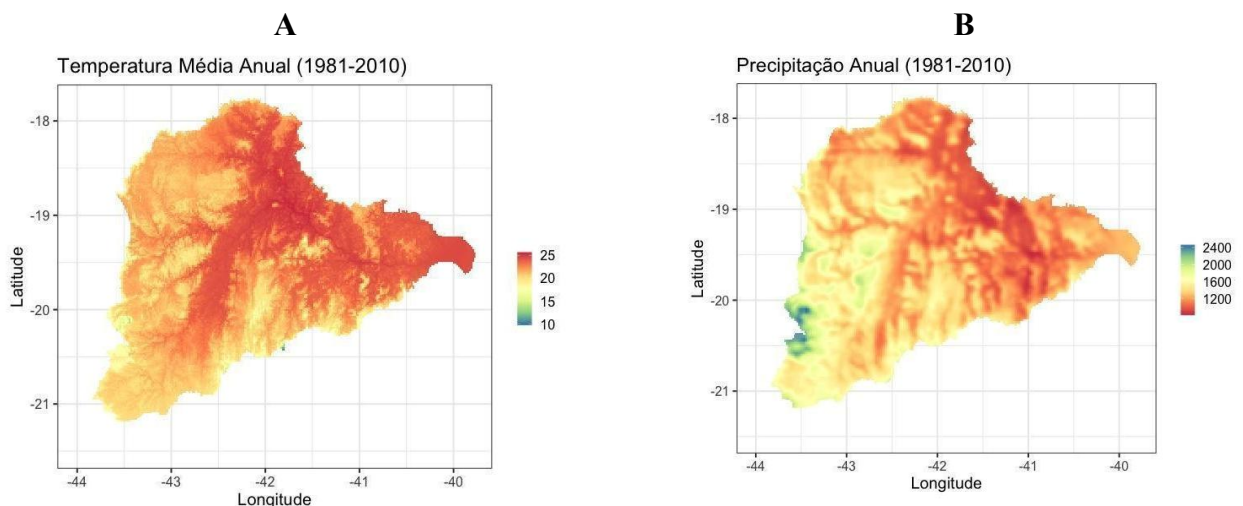
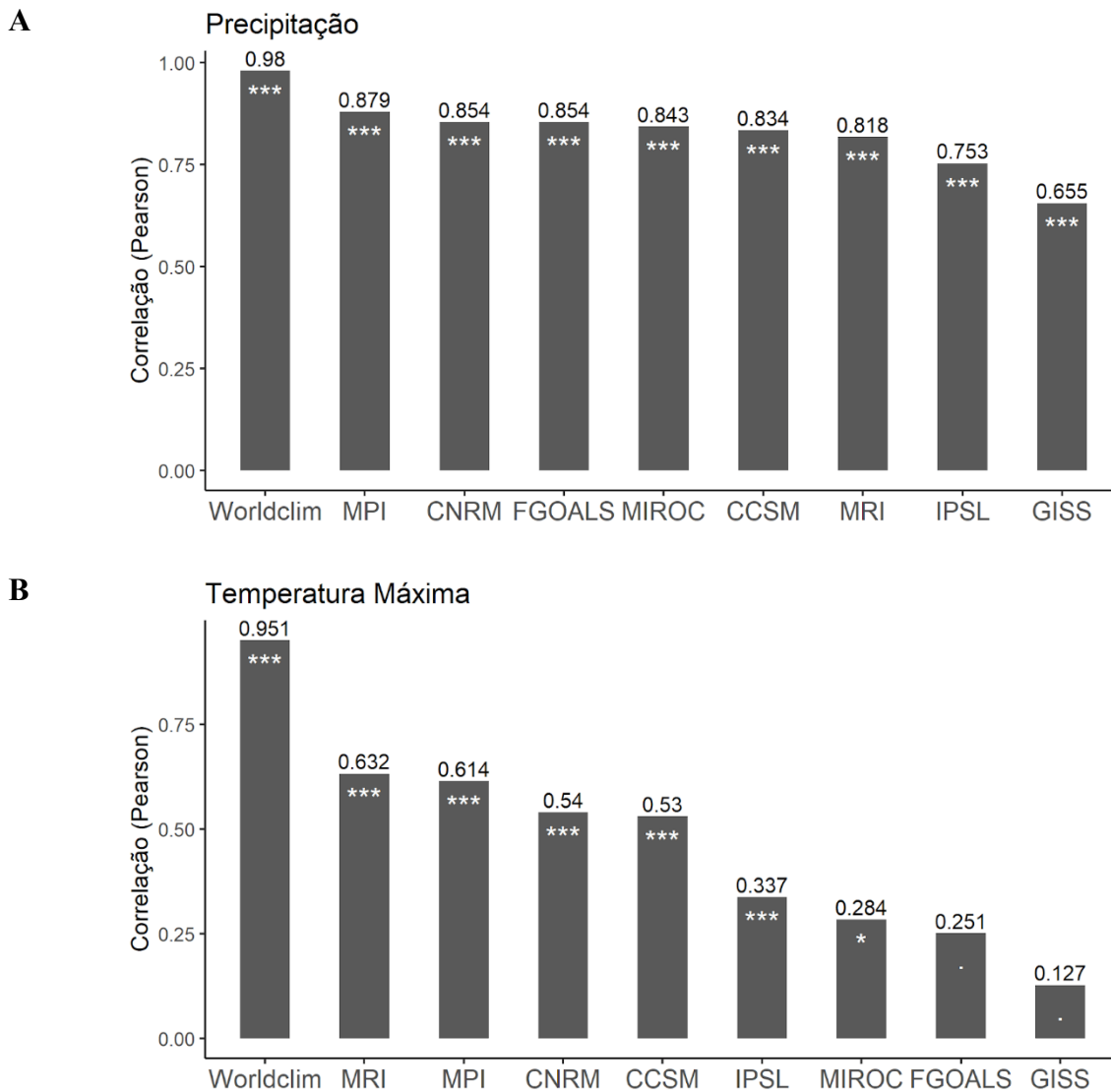


FIGURA 3. Distribuição espacial da temperatura média anual (A) e da precipitação anual (B) na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), no período de referência (1981–2010). Os valores de temperatura representam a média anual em graus Celsius (°C), variando aproximadamente de 10 °C nas áreas mais elevadas a 25 °C nas regiões mais baixas. Os valores de precipitação representam a média de precipitação em milímetros por ano (mm/ano), com gradiente variando de 1.200 a 2.400 mm/ano.

Os modelos climáticos MPI, MRI e CNRM foram os que melhor representaram a variabilidade observada nas estações da BHRD (Figura 4). O modelo MPI foi selecionado para representar as variáveis climáticas da bacia no período atual (1981–2010) porque foi o que apresentou a maior correlação entre os dados observados e projetados para os valores de precipitação e de forma significativa para os

valores de temperatura (máxima e mínima), permitindo maior precisão na caracterização espacial do clima regional (Giorgetta et al., 2018; Karger et al., 2017). Consideramos que o fator precipitação é mais importante para questões relacionadas com restauração em relação ao plantio de árvores do que os valores de temperatura.



C

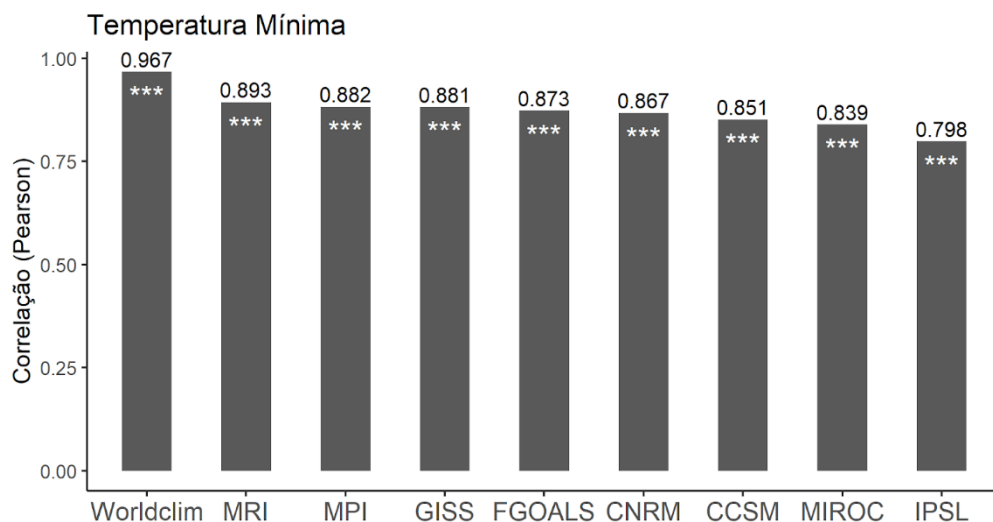


FIGURA 4. Correlação de Pearson entre os valores observados de precipitação (A), Temperatura máxima (B) e Temperatura mínima (C), nas estações meteorológicas e os simulados por diferentes Modelos de Circulação Geral (GCMs) e pelo WorldClim do presente. As estrelas (asteriscos) representam o nível de significância estatística da correlação. (***) indicam correlações altamente significativas, com $p < 0,001$, evidenciando que a relação entre os valores observados e modelados é estatisticamente robusta e pouco provável de ocorrer ao acaso. (**) indicam correlações significativas, com $p < 0,01$, também consideradas fortes e consistentes. (*) Corresponde a correlações moderadamente significativas, com $p < 0,05$, demonstrando uma associação confiável, embora menos robusta.

A seguir foram calculadas as diferenças nas médias anuais de temperatura e precipitação entre os períodos presente (1981–2010) e futuro (2041–2070), com base em três cenários de mudanças climáticas denominados SSP (Shared Socioeconomic Pathways): SSP1-2.6 (otimista), SSP3-7.0 (intermediário) e SSP5-8.5 (pessimista) (Meinshausen et al., 2020). Observou-se um gradiente espacial de mudança, com as maiores

elevações nas médias de temperatura previstas para as regiões norte e oeste da BHRD — variando aproximadamente de $+1^{\circ}\text{C}$ no cenário mais otimista até $+3^{\circ}\text{C}$ no mais pessimista (Figura 5). Em relação à precipitação, as maiores reduções foram previstas para as regiões centrais e norte da bacia, com decréscimos de até 150 mm anuais no cenário mais extremo (Figura 6).

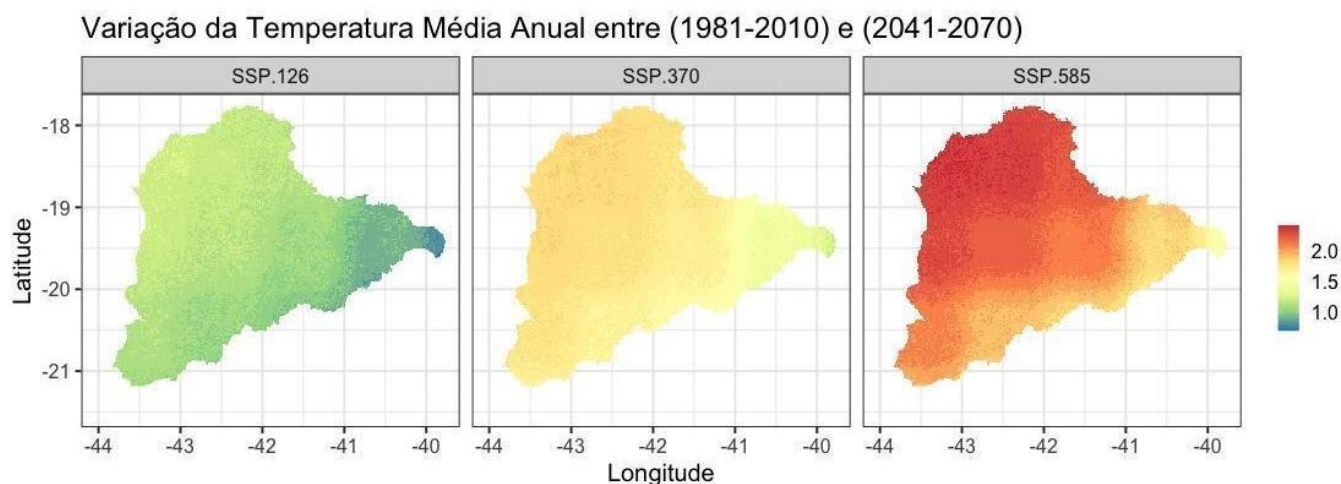


FIGURA 5. Variação projetada da temperatura média anual na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), entre os períodos de referência (1981–2010) e futuro (2041–2070), sob três cenários (SSP1-2.6 (otimista), SSP3-7.0 (intermediário) e SSP5-8.5 (pessimista)). Os valores expressam o aumento em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), indicando maior aquecimento em cenários de altas emissões.

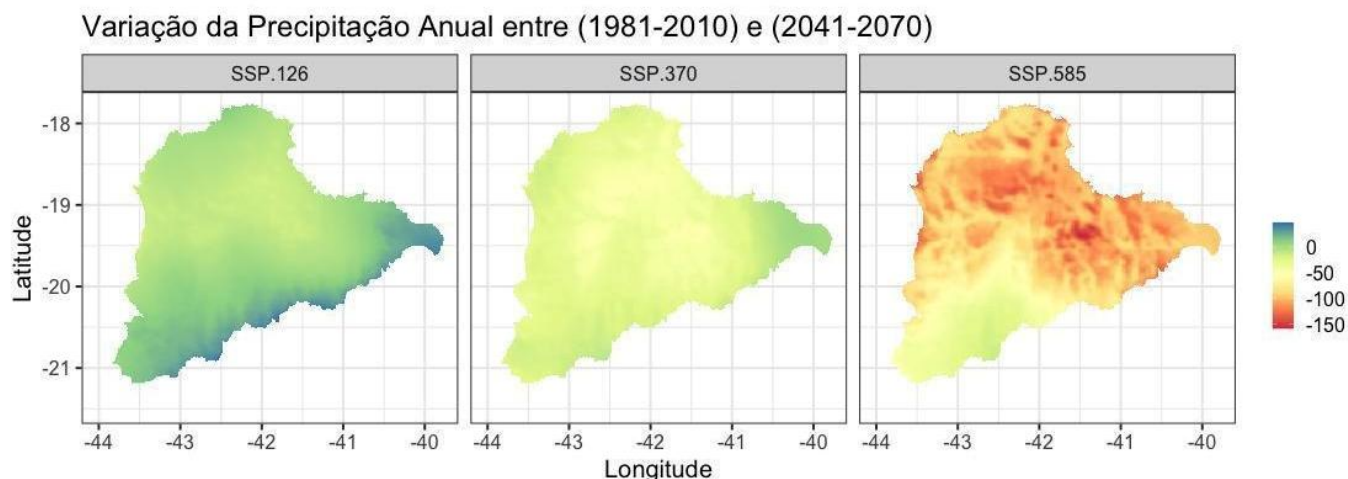


FIGURA 6. Variação projetada da precipitação anual na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), entre os períodos de referência (1981–2010) e futuro (2041–2070), sob três cenários (SSP1-2.6, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Os valores representam a diferença em milímetros por ano (mm/ano), com reduções mais intensas de precipitação indicadas em tons alaranjados e vermelhos.

DISCUSSÃO

Desempenho dos modelos climáticos e adequação regional

A correlação dos modelos MPI, MRI e CNRM frente aos dados observacionais da BHRD confirma a importância da validação regional dos GCMs antes de sua aplicação em análises ecológicas e de planejamento territorial. O modelo MPI, em particular, tem demonstrado bom desempenho em simular padrões climáticos na América do Sul, incluindo variações sazonais de temperatura e precipitação (Giorgetta et al., 2018; Marengo et al., 2012). Essa validação regional é essencial em áreas com relevo acidentado e elevada heterogeneidade climática, como a BHRD, pois modelos globais tendem a suavizar variações locais.

Além disso, a seleção do modelo climático mais adequado deve considerar não apenas a média dos desvios, mas também a capacidade do modelo em reproduzir extremos climáticos cada vez mais frequentes e relevantes para a restauração ecológica. A combinação entre dados observacionais e modelos que capturam eventos extremos pode reduzir incertezas e aumentar a robustez das projeções (Flato et al., 2013).

Projeções climáticas e implicações ecológicas

As projeções apontam para um aumento de até +3 °C na temperatura média anual e reduções de até 150 mm/ano na precipitação nas regiões centro-norte da BHRD até 2070, dependendo do cenário. Essas tendências convergem com os padrões previstos para o sudeste do Brasil por outras iniciativas, como o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [PBMCM], 2013) e estudos regionais (Chou et al., 2014; Nobre et al., 2016). As mudanças podem alterar significativamente o funcionamento dos ecossistemas, afetando desde a fenologia e fisiologia vegetal até a dinâmica de comunidades inteiras (Corlett, 2012).

Sob esse novo regime climático, espécies adaptadas a ambientes úmidos podem apresentar declínio populacional ou extinção local, enquanto espécies com maior tolerância à seca, incluindo algumas invasoras, podem expandir suas áreas de ocorrência (Bellard et al., 2012). A fragmentação do habitat e a redução de conectividade funcional tendem a se agravar, comprometendo a resiliência dos remanescentes florestais (Tabarelli et al., 2010).

Aplicações na restauração ecológica

A integração de dados climáticos futuros em ações de restauração ecológica é uma estratégia emergente, reconhecida como necessária para garantir a sustentabilidade dos projetos ao longo do tempo (Harris et al., 2006; Suding et al., 2015). Na BHRD, a priorização de áreas com menor risco climático, bem como a seleção de espécies adaptadas a estresses térmicos e hídricos, pode aumentar a taxa de sucesso dos plantios e a capacidade de recuperação dos ecossistemas (Brancalion et al., 2019).

Para isso, os dados aqui gerados podem ser usados para selecionar os melhores GCMs para a região, tornando mais simples e mais eficiente o delineamento de modelagem de nicho ecológico, baseado em dados climáticos, para auxiliar os mosaicos de restauração com base em critérios bioclimáticos, contribuindo para aumentar o potencial de sucessos dessas iniciativas frente aos desafios climáticos futuros nesta região.

Interações entre impactos locais e mudanças climáticas

A interação entre o impacto local do rompimento da barragem de Fundão e as projeções climáticas obtidas neste estudo para a região da BHRD (aumento da temperatura e redução na precipitação) pode intensificar os efeitos ecológicos negativos na bacia. A contaminação por metais pesados e o comprometimento da qualidade do solo reduzem a capacidade de regeneração natural, tornando os ecossistemas mais vulneráveis a variações climáticas (Queiroz et al., 2018).

Essa sobreposição de estressores destaca a importância de abordagens integradas que combinem mitigação de danos ambientais com adaptação às mudanças globais (Scarano, 2017). Projetos que associam recuperação de áreas contaminadas, seleção de espécies a partir de sua funcionalidade e planejamento adaptativo podem

ser mais eficientes em promover a resiliência socioecológica (Meli et al., 2017).

Limitações e perspectivas futuras

Este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A escala dos GCMs ainda representa uma barreira para análises locais, mesmo com ajustes regionais, e há incertezas inerentes às trajetórias de emissão dos cenários SSP.

Futuras investigações podem incorporar dados de diversidade funcional e genética (Violle et al., 2007), e abordagens participativas que envolvam comunidades locais na definição de áreas e metas de restauração (Reed et al., 2021). A inclusão de diferentes escalas de análise, integrando clima, biodiversidade e uso da terra, poderá ampliar o potencial de aplicação dos resultados para diferentes setores e políticas públicas, principalmente os relacionados à restauração ecológica.

CONCLUSÕES

Este estudo evidenciou a importância de uma caracterização climática detalhada da BHRD como subsídio para a seleção dos modelos climáticos que melhor caracterizam a bacia, o que é essencial para o planejamento de ações de restauração ecológica frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas. A análise comparativa entre dados observacionais oriundos de estações meteorológicas e dados modelados e projetados para o futuro permitiu identificar os modelos climáticos globais mais adequados à região, destacando-se o modelo MPI, que apresentou a maior correlação para os dados de precipitação. As projeções futuras realizadas a partir deste modelo indicam aumento de temperatura e redução da precipitação, especialmente nas porções norte e centro da bacia.

As mudanças climáticas previstas têm o potencial de alterar a estrutura e o funcionamento

dos ecossistemas da BHRD, exigindo uma abordagem que incorpore critérios climáticos na seleção de espécies, na definição de áreas prioritárias e no desenho de mosaicos de restauração ecológica. A integração entre dados climáticos, impactos locais do uso da terra e estratégias de manejo pode aumentar a eficácia das intervenções e fortalecer a resiliência da paisagem ao longo do tempo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à equipe do Instituto Nacional da Mata Atlântica, especialmente ao Programa PCI/MCTI que forneceu as bolsas de pós-doutoramento que possibilitaram a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- Araújo, M. B., Cabeza, M., & Rahbek, C. (2005). Reducing uncertainty in projections of extinction risk from climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 14(6), 529–538. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822x.2005.00182.x>
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Brancalion, P. H. S., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F. S. M., Almeyda Zambrano, A. M., Baccini, A., Aronson, J., Goetz, S., Reid, J. L., Strassburg, B. B. N., Wilson, S., & Chazdon, R. L. (2019). Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science Advances*, 5(7), eaav3223. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3223>
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Tavares, A., Sueiro, G., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., & Giarolla, A. (2014). Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, 3, 438–454. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>
- Corlett, R. T. (2012). Climate change in the tropics: The end of the world as we know it? *Biological Conservation*, 151(1), 22–25. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.11.027>
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., & Rummukainen, M. (2013). Evaluation of climate models. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis* (pp. 741–866). Cambridge University Press.
- Giorgetta, M. A., Brokopf, R., Crueger, T., Esch, M., Fiedler, S., & Helmert, J. (2018). The ICON atmosphere model with MPI physics. Part 1: Model description. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10, 1613–1637. <https://doi.org/10.1029/2017MS001242>
- Harris, J. A., Hobbs, R. J., Higgs, E., & Aronson, J. (2006). Ecological restoration and global climate change. *Restoration Ecology*, 14(2), 170–176. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2006.00136.x>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the Earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate. In W. Köppen & R. Geiger (Eds.), *Handbuch der Klimatologie* (Vol. 1, pp. 1–44). Gebrüder Borntraeger.

- Lima-Ribeiro, M. S., Varela, S., González-Hernández, J., Oliveira, G., Diniz-Filho, J. A. F., Peterson, A. T., & Terribile, L. C. (2015). ecoClimate: A database of climate data from multiple models for past, present, and future for macroecologists and biogeographers. *Biodiversity Informatics*, 10(1), 1–21. <https://doi.org/10.17161/bi.v10i0.4955>
- Marengo, J. A., Chou, S. C., Kay, G., Alves, L. M., Pesquero, J. F., Soares, W. R., Santos, D. C., Lyra, A. A., Sueiro, G., Betts, R., Chagas, D. J., Gomes, J. L., Bustamante, J. F., & Tavares, P. (2012). Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38, 1829–1848. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>
- Meli, P., Holl, K. D., Rey Benayas, J. M., Jones, H. P., Jones, P. C., Montoya, D., & Moreno Mateos, D. (2017). A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. *PLoS ONE*, 12(2), e0171368. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171368>
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Reimann, S., & Wang, R. H. J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
- Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S., & Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(39), 10759–10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>
- Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. (2013). *Impactos, vulnerabilidades e adaptação: Sumário executivo*. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do PBMC. PBMC.
- Pires, A. P. F., Rezende, C. L., Assad, E. D., Loyola, R., & Scarano, F. R. (2017). *Forest restoration can increase the Rio Doce watershed resilience. Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(3), 187–193.
- Queiroz, H. M., Nóbrega, G. N., Ferreira, T. O., Almeida, L. S., Romero, T. B., Santaella, S. T., Bernardino, A. F., & Otero, X. L. (2018). The Samarco mine tailing disaster: A possible time-bomb for heavy metals contamination? *Science of the Total Environment*, 637–638, 498–506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.370>
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.0.1). Computersoftware. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Reed, J., Kusters, K., Barlow, J., Balinga, M., Borah, J. R., Carmenta, R., Chervier, C., Djoudi, H., Gumbo, D., Laumonier, Y., Moombe, K. B., Yuliani, E. L., & Sunderland, T. (2021). Re-integrating ecology into integrated landscape approaches. *Landscape Ecology*, 36, 2395–2407. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01268-w>
- RStudio Team. (2020). *RStudio: Integrated development environment for R* (Version 1.3.959) Computersoftware. RStudio, PBC. <https://posit.co/>
- Scarano, F. R. (2017). Ecosystem-based adaptation to climate change: Concept, scalability and a role for conservation science. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(2), 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.05.003>
- Suding, K. N., Higgs, E., Palmer, M. A., Callicott, J. B., Anderson, C. B., Baker, M., Gutrich, J. J., Hondula, K. L., LaFavor, M. C., Larson, B. M. H., Randall, A., Ruhl, J. B., & Schwartz, K. Z. S. (2015). Committing to ecological restoration: Efforts around the globe

need legal and policy clarification. *Science*, 348(6235), 638–640.

<https://doi.org/10.1126/science.aaa4216>

Tabarelli, M., Aguiar, A. V., Ribeiro, M. C., Metzger, J. P., & Peres, C. A. (2010). Prospects for biodiversity conservation in the Atlantic Forest: Lessons from aging human-modified landscapes. *Biological Conservation*, 143(9), 2328–2340.

<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.05.005>

Thuiller, W. (2004). Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology*, 10, 2220–2227.

[https://doi.org/10.1111/j.1365-](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00859.x)

[2486.2004.00859.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00859.x)

Varela, S., Lima-Ribeiro, M. S., & Terribile, L. C. (2015). A short guide to the climatic variables of the Last Glacial Maximum for biogeographers. *PLoS ONE*, 10(6), e0129037.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129037>

Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., & Fortunel, C. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892.

[https://doi.org/10.1111/j.0030-](https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x)

[1299.2007.15559.x](https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x)

Wanderley, L. J., Mansur, M. S., Milanez, B., & Pinto, R. G. (2016). Desastre da Samarco/Vale/BHP no Vale do Rio Doce: Aspectos econômicos, políticos e socioambientais. *Ciência e Cultura*, 68(3), 30–35.