

A restauração da vegetação nativa pode conduzir Minas Gerais ao Net Zero?

Sofia Corradi Oliveira
Ana Carolina Caetano Rocha de Oliveira
Argemiro Teixeira Leite Filho

Libério Junio da Silva
Britaldo Soares Filho

Resumo

Nosso estudo examina o potencial da restauração de vegetação nativa em Minas Gerais para orientar o estado rumo às metas de emissões líquidas zero (Net Zero). As atividades antrópicas emitem aproximadamente 40 gigatoneladas (Gt) de dióxido de carbono (CO₂) anualmente, enquanto a capacidade global de remoção de CO₂ está em apenas 2 Gt. Essa crescente concentração de gases de efeito estufa impulsiona mudanças climáticas significativas, reforçando a necessidade urgente de reduzir as emissões. Nesse contexto, Minas Gerais aderiu voluntariamente à iniciativa global *Race to Zero* e, em 2022, lançou o Plano Estadual de Ação Climática, que enfatiza as metas de reflorestamento e reconhece o setor de Agricultura, Florestas e Outros Usos do Solo como seu maior emissor. Nossa análise estima que Minas Gerais possui aproximadamente 6,14 milhões de hectares disponíveis para a restauração da vegetação secundária, contribuindo significativamente para a meta nacional de 12 milhões de hectares estabelecida pelo Plano Nacional de Recuperação de Vegetação Nativa. Esses esforços podem potencialmente sequestrar -170 Mt CO₂ em 2050, superando medidas de mitigação projetadas em 16 vezes. No entanto, alcançar isso requer enfrentar vários desafios, incluindo garantir a permanência da vegetação restaurada e mecanismos de pagamento por serviços ambientais, bem como a integração dos métodos de restauração com sistemas agrícolas para agregação de valor econômico. Embora a restauração seja crucial para a mitigação, ela deve fazer parte de uma estratégia mais ampla que inclui eficiência energética e avanços tecnológicos. O sucesso na condução de Minas Gerais ao Net Zero depende de planejamento abrangente e coordenação intersetorial, apoiados por estimativas de emissões futuras e alinhados com os objetivos do Plano Clima nacional. Ações imediatas e concertadas envolvendo formulação de políticas, engajamento comunitário e mecanismos financeiros são vitais para alcançar essas metas de restauração.

Contextualização

Atividades antrópicas emitem aproximadamente de 40 gigatoneladas (Gt) de dióxido de carbono (CO₂) anualmente¹, enquanto a capacidade global de remoção de CO₂ é de apenas 2 Gt². O aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) eleva as temperaturas globais, desencadeando rápidas mudanças no sistema terrestre. Junho de 2024 marcou o 13º mês consecutivo de temperaturas anormalmente altas, evidenciando a emergência climática em curso³. Para mitigar os impactos dessa nova realidade e evitar seu agravamento, é essencial atingir emissões líquidas zero de CO₂ e outros GEE, comumente referido como Net Zero.

O Acordo de Paris, firmado em 2015, visa limitar o aumento da temperatura global a 1,5 °C e mantê-lo abaixo de 2 °C, além de ampliar a capacidade de adaptação aos impactos das mudanças climáticas, promovendo resiliência e desenvolvimento de baixa emissão de GEE. O acordo também busca

alinhar os fluxos financeiros globais com a transição para a neutralidade de emissões⁴. As partes apresentaram suas metas de redução de GEE por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs)⁵. O Brasil, em sua NDC, compromete-se a atingir uma meta absoluta de emissões líquidas de GEE de 1,20 Gt CO₂e até 2030, além de visar a neutralidade climática até 2050⁶.

Entre as estratégias para alcançar essas metas está o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg), que apresenta o comprometimento do país em restaurar, reflorestar e induzir a regeneração natural de 12 milhões de hectares (Mha) de vegetação até 2030⁷. Somada a essa iniciativa, o Brasil abriga o Pacto pela Restauração da Mata Atlântica, que também busca articular diferentes setores para restaurar 15 Mha de florestas no bioma até 2050⁸. Além disso, o cumprimento do Código Florestal pode ajudar a alcançar as metas climáticas de 2030, reduzindo a

lacuna para emissões líquidas zero de GEE em 38% até 2050⁹. Para atingir a meta de Net Zero até 2050, contudo, seria necessária uma restauração adicional ao déficit legal, totalizando cerca de 35 Mha de vegetação nativa, o que poderia resultar na absorção de 296 Mt CO₂ até esse ano⁹.

Em alinhamento com as diretrizes nacionais, Minas Gerais aderiu em 2021, voluntariamente, à iniciativa global *Race to Zero*, com a intenção de neutralizar as emissões líquidas de GEE até 2050¹⁰. Em 2022, a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) lançou o Plano Estadual de Ação Climática (PLAC), que inclui metas de reflorestamento para mitigação e destaca o setor de Agricultura, Florestas e Outros Usos do Solo (AFOLU) como o maior emissor, responsável por 51% do total do estado em 2019^{11,12}.

Resultados

Conduzimos o cálculo da captura potencial de carbono para o subsetor AFOLU de Mudança do uso da terra e florestas, focando no incremento de vegetação secundária. Para revisar a estimativa das áreas aptas para restauração da vegetação nativa em Minas Gerais, incluímos todo limite de áreas de pastagens degradadas²⁰. A restauração de vegetação nativa foi então dividida conforme

Minas Gerais enfrenta secas cada vez mais intensas e frequentes, impactando gravemente a produção agrícola, o abastecimento de água e a geração de energia¹³⁻¹⁵. Eventos extremos de chuva também têm sido observados e projetados^{16,17}. Esse cenário exacerbado pela emergência climática intensifica desigualdades sociais e econômicas^{18,19}, ressaltando a urgente necessidade de estratégias abrangentes de adaptação e mitigação, incluindo políticas para restauração de vegetação nativa e reflorestamento. Aqui, objetivamos identificar as áreas disponíveis para restauração da vegetação nativa em Minas Gerais e, a partir de então, avaliar o potencial dessa restauração na contribuição para o objetivo estadual no *Race to Zero* até 2050.

método passivo (regeneração natural espontânea ou assistida) ou ativo (práticas intervencionistas), com base em mapeamento espacial da favorabilidade de regeneração natural²¹. As áreas aptas para restauração em relação a método e bioma são apresentadas na Figura 1 e, conforme Tabela 1, somam cerca de 6,14 Mha.

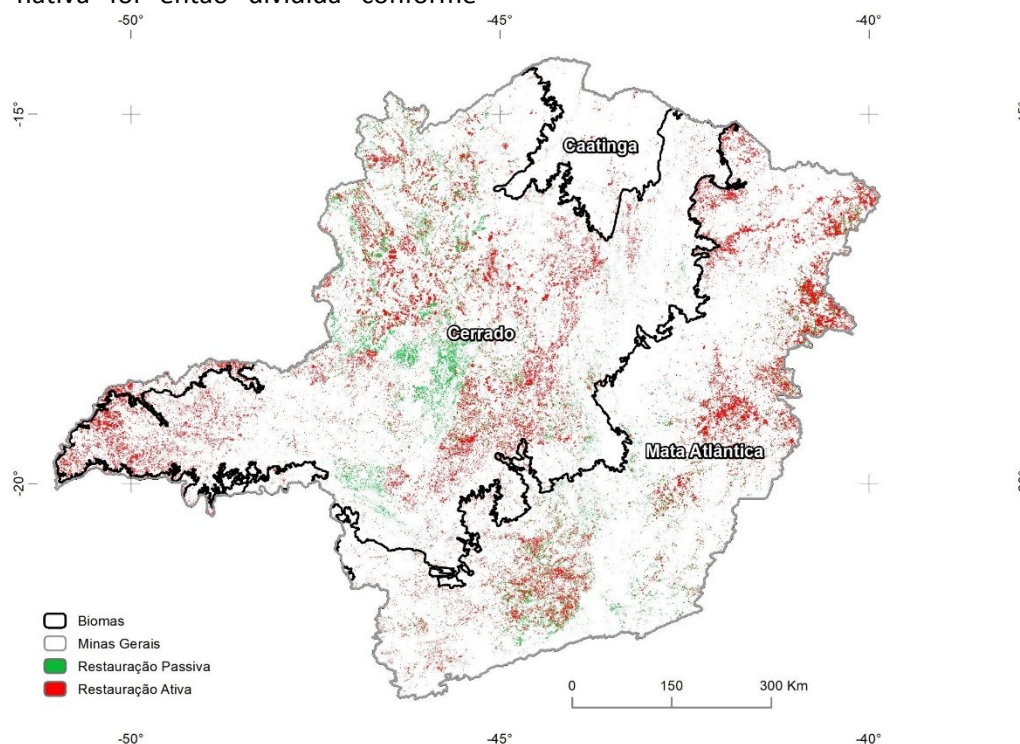


Figura 1 - Áreas aptas para restauração - Potencial Net Zero no estado de Minas Gerais até 2050

Tabela 1 - Áreas aptas para restauração - Potencial Net Zero no estado de Minas Gerais até 2050

Bioma	Área (Mha)		
	Ativo	Passivo	Total
Caatinga	0,04	0,0006	0,04
Cerrado	2,46	1,07	3,53
Mata Atlântica	1,99	0,58	2,57
Total	4,49	1,65	6,14

Os estoques de CO₂ foram estimados a partir do carbono total da vegetação acima e abaixo do solo através do mapa de vegetação pretérita do IV Inventário Brasileiro de Emissões de GEE²². O carbono orgânico do solo não foi contabilizado devido à incerteza em seu levantamento, considerando variabilidade espacial e temporal,

além da limitação em seu potencial de recuperação^{23,24}. Ainda, foi descontado o carbono na biomassa para o uso anterior, de pastagem²⁵. A contabilização da remoção de dióxido de carbono dessa vegetação alocada nas áreas anteriormente definidas é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Remoções absolutas de dióxido de carbono para restauração da vegetação

Bioma	Mt CO ₂ e		
	Uso anterior	Uso posterior	Remoções absolutas
Caatinga	1,0	9,0	
Cerrado	96	490	
Mata Atlântica	70	799	
Total	167	1298	1131

Um dos principais erros na contabilização de carbono em projetos de restauração é subestimar o tempo necessário para que a vegetação atinja seu pleno potencial de captura de carbono²⁶. Pesquisas mostram que uma vegetação secundária precisa de mais de 40 anos para alcançar a estrutura de ecossistema maduro^{27,28}. Embora o carbono acima do solo continue a se acumular após 100 anos de regeneração²⁹, estoques de carbono em vegetação nativa podem ser restaurados em cerca de 30 anos por meio de técnicas de restauração ativa³⁰.

Devido às incertezas na exatidão da contabilização e considerando a diversidade das áreas selecionadas em todo o estado, incluindo diferenças de bioma e método, estimamos que a remoção de carbono calculada seria alcançada em um horizonte de 50 anos (2025-2075). Utilizando um modelo de crescimento logístico para simular a evolução dos estoques de carbono (ver Figura 2), espera-se uma remoção incremental de -170 Mt CO₂e para o ano de 2050.

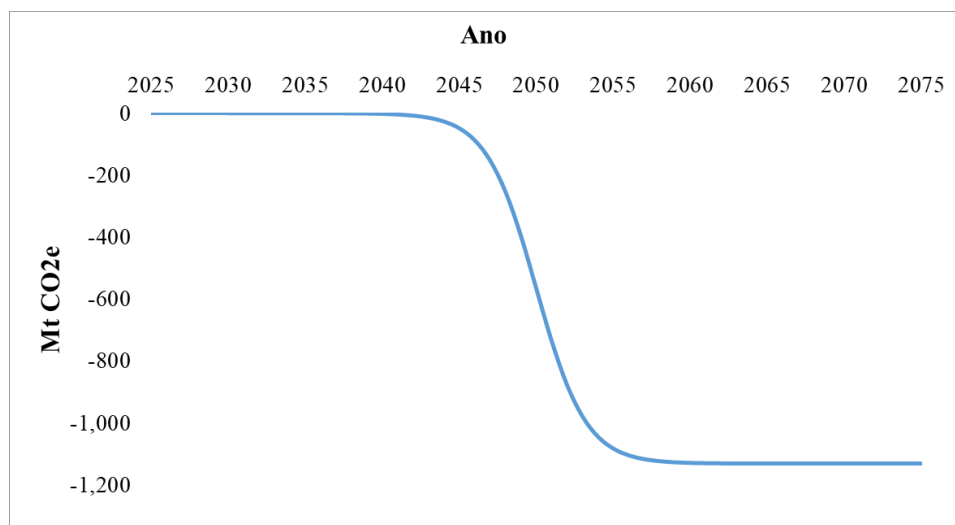


Figura 2 - Modelo de crescimento logístico para estoque de carbono para restauração da vegetação nativa

O Plano de Descarbonização de Minas Gerais de 2022 detalha que, para viabilidade de cenário Net Zero, o subsetor de Mudança no uso da terra e florestas deve atingir emissões líquidas de -68,81 Mt CO₂e³¹. Esses resultados são estabelecidos, entre outros fatores, a partir da premissa de zerar o desmatamento ilegal até 2028, e da compensação de todo o desmatamento legal, que poderia incluir reflorestamento, criação de Reservas Legais (RL), pagamento de multas, aquisição de Cotas de Reserva Ambiental (CRAs), estabelecimento de Termo de Ajustamento de Conduta (TACs) e projetos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSAs). Destaca-se que, em 2019, áreas protegidas representaram significativa parcela de remoção do setor, próximo a -3 Mt CO₂e³², o que reforça a importância do controle do desmatamento. A partir de 2028, o cenário Net Zero considera restauração da vegetação nativa até atingir o então estimado déficit do Código Florestal³¹. Atualmente, os déficits de RLs e Área de Preservação Permanente (APP) somam 1,14 Mha em Minas Gerais, e cerca de 19 Mha no Brasil³³. Esses déficits não representam alocação espacial e, dessa forma, as áreas de pastagem degradadas inicialmente definidas representam oportunidade para conformidade ambiental de proprietários e ainda superam os valores, dada sua soma de 6,14 Mha.

A discriminação de cálculo para vegetação secundária no 4º Inventário de Minas Gerais³²

representa cerca de -0,8 Mt CO₂e em 2019. Por sua vez, ao avaliar a contribuição do estado para as metas da NDC brasileira, estudo determinou que as remoções no setor de uso do solo permaneceriam em -2,80 Mt CO₂e até 2030, contabilizando principalmente áreas protegidas³⁴. Adicionalmente, medidas de mitigação elaboradas a partir de objetivo do Plano Mineiro de Desenvolvimento Integrado 2019-2030³⁵, incluindo restauração de pastagens degradadas, expansão do reflorestamento de espécies nativas, integração de sistemas de floresta e pecuária, e aumento de plantações comerciais de árvores, poderiam representar -10,4 Mt CO₂ anualmente entre 2030 e 2050³⁶.

Nossa análise do potencial de restauração da vegetação nativa em Minas Gerais destaca sua capacidade de contribuir para a meta de emissões líquidas zero, conforme comparado a metas e quantificações existentes. Apesar de irmos além dos 1,14 Mha em déficits do Código Florestal, os 6,14 Mha em disponíveis para restauração em Minas Gerais devem ser considerados no contexto das metas nacionais de 12 Mha do Planaveg, do déficit de 19 Mha e dos cerca de 35 Mha necessários para zerar as emissões líquidas^{7,9,33}. Em termos de remoção por vegetação secundária, a projeção de -170 Mt CO₂e para 2050 supera em 16 vezes os -10,4 Mt CO₂ esperados para medidas de mitigação citadas no parágrafo anterior³⁶.

Conclusões e recomendações

Estimativas históricas apontam para limitações na realização completa desse potencial sequestro de 170 Mt CO₂e. Planejar e implementar estrategicamente a restauração de vegetação nativa, especialmente em áreas de pastagem pouco produtivas, continua sendo crítico para maximizar a eficácia e eficiência desses esforços. Embora a restauração seja vital para a mitigação³⁷, ela não deve ser vista como uma solução isolada. A agricultura no setor AFOLU, um importante motor econômico, é também uma das principais fontes de emissão no estado³⁸. Nesse sentido, adotar métodos de restauração que integrem sistemas agrícolas³⁹ poderia oferecer alternativas viáveis para áreas não abrangidas por este estudo. Quanto mais medidas de mitigação forem adotadas no setor de uso da terra, menos dependentes seremos de soluções tecnológicas dispendiosas em outros setores, como o energético⁹. Uma abordagem bem-sucedida rumo ao Net Zero requer a consideração simultânea de soluções para eficiência energética, redução de custos tecnológicos e desenvolvimento de novos mecanismos de financiamento⁴⁰.

Incertezas

Apesar do potencial de -170 Mt CO₂e calculado representar grande oportunidade para as metas climáticas, superior a estudos e estimativas apresentados, destacamos que existem muitos entraves para a permanência da vegetação secundária, uma vez que, por exemplo, quase um terço de florestas secundárias regeneradas entre 1985 e 2019 na Mata Atlântica foram novamente desmatadas em menos de 10 anos⁴². Além disso, o calor excessivo, a seca ou o aumento de incêndios podem ter um impacto negativo na integridade do carbono restaurado⁴³.

Outra questão está associada aos diferentes métodos de restauro, suas imprecisões na previsão de resultados esperados⁴⁴, e seu custo-benefício para alocação, uma vez que, mesmo apesar do alto valor de execução, a restauração ativa se mostra

Para alcançar o Net Zero em Minas Gerais, é imperativo criar uma estimativa realista de emissões futuras, que sirva como base para o planejamento estratégico. Isso inclui o desenvolvimento de um modelo logístico de crescimento do estoque de carbono, tempo de implementação, ganhos ambientais e retorno financeiro. Em nível nacional, iniciativas do Plano Clima⁴¹ buscam coordenar ações para a transição a uma economia de emissões líquidas zero, com a Estratégia Nacional de Mitigação apoiando a nova NDC brasileira e abrangendo planos setoriais e subnacionais robustos a curto, médio e longo prazo. Este é um momento crucial para definir novas metas quantificáveis para a restauração da vegetação secundária e garantir que os esforços para as alcançar sejam eficazes. Os próximos anos serão fundamentais para ações consistentes e bem planejadas que possam alinhar metas intersetoriais através de políticas, incentivos, e engajamento comunitário.

historicamente predominante na Mata Atlântica e na América Latina^{45,46}.

Por fim, importante ressaltar a incerteza dos parâmetros do próprio modelo de crescimento logístico apresentado na Figura 2. O modelo é dado pela Equação 1:

$$f(x) = \frac{L}{1 + e^{-k(x-x_0)}}$$

Na qual:

x_0 = valor no ponto médio da curva sigmoide (25 anos),

L = valor máximo da curva (-1.131 Mt CO₂e),

k = declividade da curva (0,62, definido após fixação dos outros parâmetros).

A curva, contudo, pode apresentar comportamento variado respeitando a ordem de grandeza dos valores e admitindo considerações adicionais, como a rápida acumulação de carbono acima do solo nos estágios iniciais do crescimento devido a espécies pioneiras^{47,48}, bem como a variação da taxa de recuperação da biomassa antes e depois dos 20 primeiros anos, sem mencionar a variabilidade espacial de seu comportamento⁴⁹. De

forma comparativa, gerou-se curva que mantivesse $f(0)$ limitado a -10^1 e assumindo $x_0 = 20$ anos. A nova curva, comparada à anterior, é apresentada na Figura 3. Para o modelo alternativo, a remoção incremental em 2050 seria -51 Mt CO₂e, valor que ainda supera os $-10,4$ Mt CO₂ esperados para medidas de mitigação em Minas Gerais.

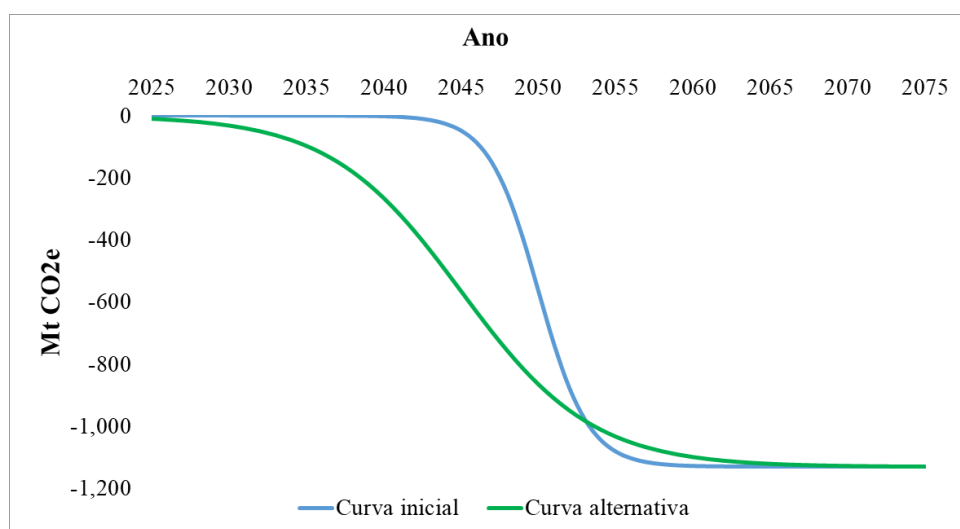


Figura 3 - Comparativo de modelos de crescimento logístico para estoque de carbono para restauração da vegetação nativa

Referências

1. Friedlingstein, P. et al. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data* **15**, 5301–5369 (2023).
2. Vaughan, N. et al. The State of Carbon Dioxide Removal. (2024) doi:10.17605/OSF.IO/F85QJ.
3. WMO - World Meteorological Organization. Record temperature streak continues in June. <https://wmo.int/media/news/record-temperature-streak-continues-june> (2024).
4. UNFCCC - United Nations Framework on Climate Change. *The Paris Agreement*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf (2016).
5. Souza, M. C. O. & Corazza, R. I. Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. *Desenvolv. Meio Ambiente* **42**, (2017).
6. Brasil. Ministério do Meio Ambiente. *Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) Para o Acordo de Paris No Âmbito Da UNFCCC*. <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2023/11/NDC-1.4-Brasil-27-out-2023-portugues.pdf> (2023).
7. Brasil. Ministério do Meio Ambiente. *Planaveg: Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa*. (MMA, 2017).
8. Pinto, S. R. et al. Governing and Delivering a Biome-Wide Restoration Initiative: The Case of Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil. *Forests* **5**, 2212–2229 (2014).

9. Soterroni, A. C. *et al.* Nature-based solutions are critical for putting Brazil on track towards net-zero emissions by 2050. *Global Change Biology* **29**, 7085–7101 (2023).
10. SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Minas Gerais formaliza adesão à campanha mundial Race to Zero para zerar emissões de carbono. <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/4732-minas-gerais-formaliza-adesao-a-campanha-mundial-race-to-zero-para-zerar-emissoes-de-carbono> (2021).
11. ICLEI América do Sul. *Plano Estadual de Ação Climática de Minas Gerais*. <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/78/2023/06/plac-mg-05062023.pdf> (2023).
12. Minas Gerais. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Dia Nacional de Conscientização sobre Mudanças Climáticas: conheça as ações do Estado para desenvolver uma economia de baixo carbono. <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/5507-dia-nacional-de-conscientizacao-sobre-mudancas-climaticas-conheca-as-acoes-do-estado-para-desenvolver-uma-economia-de-baixo-carbono> (2023).
13. Costa, L. C., Martins do Amaral Cunha, A. P., Anderson, L. O. & Cunningham, C. New approach for drought assessment: A case study in the northern region of Minas Gerais. *International Journal of Disaster Risk Reduction* **53**, 102019 (2021).
14. Junqueira, R., Viola, M. R., Amorim, J. da S. & Mello, C. R. de. Hydrological Response to Drought Occurrences in a Brazilian Savanna Basin. *Resources* **9**, 123 (2020).
15. Melo, L. B., Estanislau, F. B. G. L. e, Costa, A. L. & Fortini, Â. Impacts of the hydrological potential change on the energy matrix of the Brazilian State of Minas Gerais: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **110**, 415–422 (2019).
16. Nascimento, A. S. do *et al.* Análise de chuvas intensas para o município de Belo Horizonte. *Brazilian Journal of Development* **6**, 32184–32218 (2020).
17. Reboita, M. S., Marrafon, V. H. de A., Llopart, M. & Rocha, R. P. da. Cenários de mudanças climáticas projetados para o estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia* (2018) doi:10.5380/abclima.v1i0.60524.
18. Barbieri, A. F. *et al.* Population transitions and temperature change in Minas Gerais, Brazil: a multidimensional approach. *Rev. bras. estud. popul.* **32**, 461–488 (2015).
19. Braga, N. I. & Montenegro, R. L. G. Efeitos das mudanças climáticas sobre a agropecuária de Minas Gerais: uma abordagem contemporânea. *Novos Cadernos NAEA* **23**, (2021).
20. Lapig/UFMG - Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás. Atlas das Pastagens. (2024).
21. Nunes, F. S. M., Soares-Filho, B. S., Rajão, R. & Merry, F. Enabling large-scale forest restoration in Minas Gerais state, Brazil. *Environ. Res. Lett.* **12**, 044022 (2017).
22. Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. Mapa de vegetação natural pretérita do IV Inventário Brasileiro de Emissões de GEE. (2021).
23. Hurtt, G. *et al.* Beyond MRV: high-resolution forest carbon modeling for climate mitigation planning over Maryland, USA. *Environ. Res. Lett.* **14**, 045013 (2019).
24. Sanderman, J., Hengl, T. & Fiske, G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **114**, 9575–9580 (2017).
25. EMBRAPA. BRLUC - Brazilian Land Use Change. (2022).

26. Lefebvre, D. *et al.* Assessing the carbon capture potential of a reforestation project. *Sci Rep* **11**, 19907 (2021).
27. Piotto, D., Montagnini, F., Thomas, W., Ashton, M. & Oliver, C. Forest recovery after swidden cultivation across a 40-year chronosequence in the Atlantic forest of southern Bahia, Brazil. *Plant Ecol* **205**, 261–272 (2009).
28. Schmidt, M. V. C. *et al.* Indigenous Knowledge and Forest Succession Management in the Brazilian Amazon: Contributions to Reforestation of Degraded Areas. *Front. For. Glob. Change* **4**, (2021).
29. Jones, I. L. *et al.* Above- and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. *Science of The Total Environment* **697**, 133987 (2019).
30. Bieluczyk, W. *et al.* Forest restoration rehabilitates soil multifunctionality in riparian zones of sugarcane production landscapes. *Sci. Total Environ.* **888**, (2023).
31. Schaeffer, R. *et al.* *Relatório Síntese da Modelagem Setorial para o Estado de Minas Gerais.* (2022).
32. FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. *4º Inventário de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa de Minas Gerais.* http://www.feam.br/images/stories/2022/GEE/Relat%C3%B3rio_Invent%C3%A1rio_MG_02092022.pdf (2022).
33. CSR - Centro de Sensoriamento Remoto & LAGESA - Laboratório de Gestão de Serviços Ambientais. *Panorama do Código Florestal Brasileiro - 2ª ed.* https://csr.ufmg.br/radiografia_do_cf/pt/ (2023).
34. Rovere, E. L. L., Dubeux, C. B. S., Guimarães, B. S. & Nogueira, E. C. *Assessment of the Emissions Estimates up to 2030 (Reference Case Scenario) for Pilot States and Evaluation of Their Contribution to the Brazilian NDC Targets.* https://climateactiontransparency.org/wp-content/uploads/2022/04/D5_Assessment-of-the-emissions-estimates-up-to-2030-Reference-Case-Scenario-1.pdf (2021).
35. Minas Gerais. Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão. *PMDI 2019-2030 - Plano Mineiro de Desenvolvimento Integrado.* https://www.mg.gov.br/system/files/media/planejamento/documento_detalhado/2022/planejamento-e-orcamento/plano-mineiro-de-desenvolvimento-integrado-pmdi/pmdi_2019-2030_virtual2.pdf (2019).
36. Rovere, E. L. L., Dubeux, C. B. S., Guimarães, B. S. & Nogueira, E. C. *Report with Assessment of the Mitigation Actions That Could Be Implemented in the Three Selected States and an Evaluation of Their Potential.* https://climateactiontransparency.org/wp-content/uploads/2022/04/D6_Report-with-assessment-of-the-mitigation-actions-that-could-be-implemented-in-the-three-selected-states-and-an-evaluation-of-their-potential-1.pdf (2021).
37. He, T. *et al.* Meta-analysis shows the impacts of ecological restoration on greenhouse gas emissions. *Nat Commun* **15**, 2668 (2024).
38. Rovere, E. L. L., Dubeux, C. B. S., Guimarães, B. S. & Nogueira, E. C. *Evaluation of Historical Sectoral Emissions and Possible Trends of the Pilot States.* https://climateactiontransparency.org/wp-content/uploads/2022/04/D4_Evaluation-of-sectoral-emissions-1.pdf (2020).
39. Silva, L. J. *et al.* Soil carbon dynamics in integrated agricultural systems in Minas Gerais state, Brazil: A meta-analysis. *Geoderma Regional* **36**, e00761 (2024).
40. Krishnan, M. *et al.* An affordable, reliable, competitive path to net zero. (2023).

41. Brasil. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Plano Clima. *Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima* <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/plano-clima>.
42. Brancalion, P. H. S. *et al.* A call to develop carbon credits for second-growth forests. *Nat Ecol Evol* **8**, 179–180 (2024).
43. Zanini, A. M., Mayrinck, R. C., Vieira, S. A., de Camargo, P. B. & Rodrigues, R. R. The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management* **481**, 118734 (2021).
44. Brancalion, P. H. S. *et al.* Balancing economic costs and ecological outcomes of passive and active restoration in agricultural landscapes: the case of Brazil. *Biotropica* **48**, 856–867 (2016).
45. Brancalion, P. H. S. *et al.* Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Sci. Adv.* **5**, eaav3223 (2019).
46. Cole, R. J. *et al.* Forest restoration in practice across Latin America. *Biological Conservation* **294**, 110608 (2024).
47. Aryal, D. R., De Jong, B. H. J., Ochoa-Gaona, S., Esparza-Olguin, L. & Mendoza-Vega, J. Carbon stocks and changes in tropical secondary forests of southern Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **195**, 220–230 (2014).
48. Wallwork, A. *et al.* Soil carbon dynamics are linked to tree species growth strategy in a naturally regenerating tropical forest. *Front. For. Glob. Change* **6**, (2023).
49. Chen, N. *et al.* Revealing the spatial variation in biomass uptake rates of Brazil’s secondary forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **208**, 233–244 (2024).