

VALORAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BEBEDOURO, MS, BRASIL: MODELAGEM DO ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO NO CENÁRIO DE CONTINUIDADE DE MUDANÇAS ATUAIS

Bruna Dienifer Souza Sampaio ¹
Vitor Matheus Bacani ²
Bruno Henrique Machado da Silva ³
Amanda Ayumi de Souza Amede Sato ⁴

INTRODUÇÃO

Os recursos naturais são limitados e ameaçados, exigindo ações globais de mitigação. É fundamental garantir a segurança hídrica, energética e alimentar para o futuro, analisando os impactos das ações humanas nos ecossistemas, que podem ser tanto positivos quanto negativos (Costanza, 1997; Daily, 1997; Kremen, 2005; Hackbart, 2016).

A Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro (BHCB) está situada no Cerrado⁵ o segundo maior bioma do Brasil e um hotspot mundial de biodiversidade, com alta prioridade para conservação (Brasil, 2007; Chaplin-Kramer et al., 2015). A região é um importante polo agrícola, dominada pela silvicultura de eucalipto grandis e abriga uma fábrica internacional de papel e celulose. A BHCB encontra-se na zona de transição entre o Cerrado e a Mata Atlântica, com um pequeno enclave na foz, próximo ao Rio Paraná (Embrapa, 2011).

A costa leste de Mato Grosso do Sul abriga mais de 1,1 milhão de hectares de eucalipto plantado, com maior concentração nos municípios de Três Lagoas (23,4%), Ribas do Rio Pardo (19%) e Água Clara (11,7%) (Famasul, 2022). De acordo com Oliveira et al. (2020), essas áreas passaram por uma significativa transformação

¹ Doutora em Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, bruna.sampaio@ufms.br;

² Professor Associado da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, vitor.bacani@ufms.br;

³ Doutorando do Programa de Pós-graduação em Geografia - PPGGEO da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, bruno.machado@ufms.br;

⁴ Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Geografia - PPGGEO da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, ayumi.sato@ufms.br.

⁵ Proporciona serviços ecossistêmicos abrangentes como o fornecimento de água por meio do escoamento superficial, recarga de água subterrânea e fluxos atmosféricos de vapor de água; armazenamento de grande quantidade de carbono em suas florestas, especialmente nas raízes profundas das árvores; alta biodiversidade de modo a oferecer recursos para o sustento da vida de agricultores familiares (CEPF, 2011).

econômica, migrando da pecuária extensiva para o cultivo intensivo de eucalipto, principalmente para abastecer as fábricas de papel e celulose de Três Lagoas, colocando o estado no topo da produção nacional de celulose. No entanto, quais são as consequências dessas mudanças? Com as atuais tendências de uso e cobertura da terra, qual será o cenário futuro? Esse cenário estará alinhado com os princípios dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU?

O Brasil assumiu compromissos ambientais, como o Acordo de Paris de 2015, com metas para 2050, e o estado de Mato Grosso do Sul se comprometeu, na COP26, a neutralizar as emissões de carbono até 2030. A Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) e o Plano Estadual MS Carbono Neutro (PROCLIMA) são iniciativas-chave para alcançar essa meta. Nacionalmente, destaca-se o "Marco Referencial em Serviços Ecosistêmicos" (Embrapa; Ministério da Agricultura, 2019), que abrange todos os benefícios diretos e indiretos que os ecossistemas oferecem à população, sendo fundamentais para a sustentabilidade socioeconômica e ambiental da agricultura (Daily, 1997; Constanza et al., 1997; Mea, 2005).

Dessa forma, a modelagem e valoração dos serviços ecossistêmicos são essenciais para o planejamento físico-territorial. Os estudos de Costanza et al. (1997) e a Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MEA, 2005) impulsionaram a valoração econômica dos serviços ecossistêmicos, colocando o tema na agenda política.

A valoração ambiental visa atribuir um valor monetário aos recursos naturais e serviços ecossistêmicos, quantificando os benefícios ou custos das melhorias ambientais ou das consequências da degradação. Como ferramenta metodológica, a valoração ambiental é essencial para subsidiar decisões sobre o uso dos recursos naturais (Andrade et al., 2012).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo modelar e avaliar os serviços ecossistêmicos de estoque e sequestro na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) para os anos de 2033 e 2051, no cenário de Continuidade de Mudanças Atuais (CMA), de modo a contribuir para a valoração ambiental.

METODOLOGIA

A metodologia envolveu a revisão de literatura sobre o tema e o mapeamento do uso e cobertura da terra utilizando a plataforma *Google Earth Engine* e o algoritmo Random Forest. O processo incluiu o treinamento e a validação da classificação, resultando em mapas de uso e cobertura da terra (UCT) para os anos de 1984, 2004, 2009,

2015 e 2021, que foram processados no software ArcGIS (ESRI, 2012). A modelagem de cenários futuros foi realizada no software PlusModel (Liang et al., 2021). Considerou-se o mapa de transição entre os usos do solo dos anos de 2015 (tempo 1) e 2021 (tempo 2). As variáveis explicativas (MDE, estradas, hidrografia, limites de imóveis rurais, silvicultura, sede da fábrica e áreas restritivas – APP e RL) foram inseridas para compreender a expansão utilizando o modelo Random Forest. Após a integração com o aprendizado de máquina, o modelo de Continuidade de Mudanças Atuais (CMA) recebeu a distribuição de sementes aleatórias para permitir a modelagem preditiva dos dados, seguida pela validação estatística.

Após a obtenção dos dados de UCT, utilizou-se o modelo do InVEST⁶ (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*) para estimar o sequestro de carbono com base no cenário de CMA e calcular o valor financeiro dos serviços ecossistêmicos. Os dados de entrada foram a biomassa acima e abaixo do solo, matéria morta (inventário do IPCC, 2006; 2019) e carbono orgânico do solo, os quais foram obtidos por meio de revisão de literatura e trabalho de campo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta o estoque de carbono no CMA na BHCB. A análise temporal mostra variações de 1984 a 2051. Em 1984, o estoque de carbono era de 1.710.600,81 Mg C, reduzindo-se até 2009 para 1.666.990,63 Mg C, seguido por um aumento em 2015 para 1.694.200,05 Mg C. Em 2021, o estoque caiu ligeiramente para 1.693.798,83 Mg C. No CMA, espera-se um aumento para 1.711.252,70 Mg C em 2033 e 1.736.646,00 Mg C em 2051, sugerindo um crescimento na capacidade de sequestro de carbono devido à expansão da silvicultura.

As variações no estoque de carbono são influenciadas por mudanças no uso da terra, práticas agrícolas, eventos climáticos e políticas ambientais. O CMA sugere que as tendências atuais continuarão até 2033 e 2051, refletindo as práticas observadas.

O aumento do estoque de carbono na bacia hidrográfica é atribuído à expansão da silvicultura extensiva, especialmente do eucalipto, utilizado na produção de papel e celulose. Essa prática contribui para o aumento do carbono estocado devido ao menor

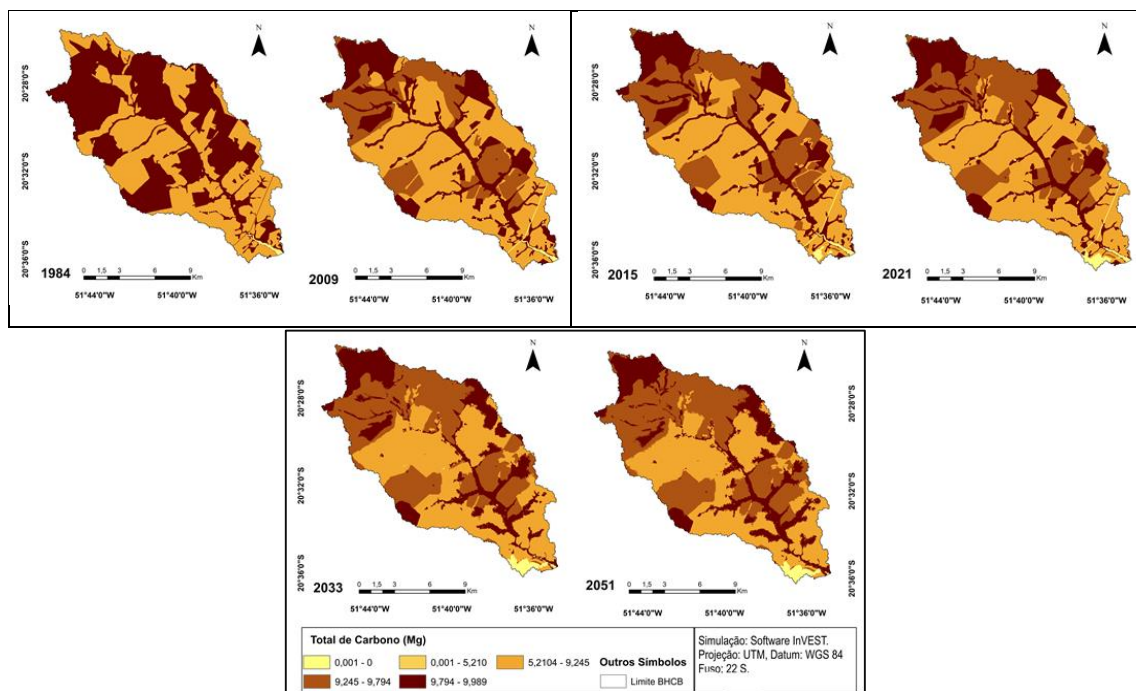
⁶ Desenvolvido pela Universidade de Stanford com o apoio da The Nature Conservancy e do World Wildlife Fund, o InVEST é um conjunto de ferramentas que mapeia e quantifica serviços ecossistêmicos, incluindo o sequestro de carbono.

revolvimento do solo. No entanto, por ser uma monocultura, a silvicultura de eucalipto não substitui a vegetação natural e carece de biodiversidade. O reflorestamento com vegetação nativa é essencial para restaurar a resiliência do ecossistema e promover o equilíbrio da biodiversidade na área (Brasil, 2007; Ogassavara, 2008; Carvalho et al., 2010; Kuntschik, 2011; Chaplin-Kramer et al., 2015; Rodriguez, 2015; Pereira, 2020). A Figura 1 ilustra a distribuição espacial do estoque de carbono ao longo dos anos, refletindo o uso e a cobertura da terra.

Tabela 1. Estoque de Carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA).

Ano	1984	2009	2015	2021	2033	2051
Água	0	0	0	0	0	0
Vegetação Aluvial	250.848,89	288.141,56	272.297,42	233.616,14	202.757,03	213.496,30
Formação Savânica-Florestal	894.495,46	310.152,97	300.470,50	298.959,76	291.572,83	276.975,60
Pastagem	560.982,99	572.686,23	524.991,09	513.611,49	489.923,13	458.493,50
Silvicultura	4.273,47	496.009,86	596.441,04	647.611,44	726.999,71	787.681,10
Área Construída	0	0	0	0	0	0
Total de Estoque (Mg/C)	1.710.600,81	1.666.990,63	1.694.200,05	1.693.798,83	1.711.252,70	1.736.646,00

Figura 1. Estoque de Carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA).



Em 1984, o estoque de carbono era maior devido à predominância de vegetação nativa, como o Cerrado e áreas de Mata Atlântica. No entanto, em 2009, após mudanças significativas no uso da terra, grande parte dessa vegetação foi substituída por silvicultura, resultando em uma redução do estoque de carbono. Entre 2015 e 2021, a expansão da silvicultura em áreas anteriormente ocupadas por pastagens aumentou moderadamente o estoque de carbono. As projeções para 2033 e 2051 indicam uma redução adicional das

áreas de vegetação nativa e um aumento das áreas de silvicultura. A Tabela 2 apresenta o total de sequestro de carbono no CMA na BHCB.

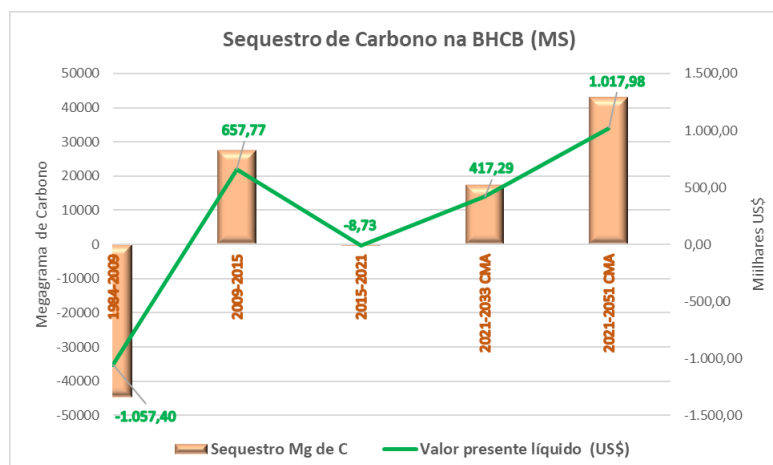
Entre 1984 e 2009, a conversão de vegetação nativa para pastagem resultou na liberação de -44.429,09 Mg de carbono na atmosfera.

Tabela 2. Total de Sequestro de Carbono no cenário de CMA.

Classes	1984	1984 - 2009	2009 - 2015	2015 - 2021	2021 - 2033	2021 - 2051
Água	1.199,25	-2.840,13	-2.590,29	-170,28	0	0
Vegetação Aluvial	-21.148,65	31.309,01	11.250,09	9.822,06	22.541,49	37.242,45
Formação Savânica-Florestal	-185.169,27	37.046,97	4.648,77	4.747,23	13.143,78	17.904,87
Pastagem	164.802,58	-188.405,46	-25.084,89	-38.204,37	-29.304,27	-26.226,18
Silvicultura	-4.112,99	82.630,58	43.322,30	29.679,11	15.383,42	18.755,80
Área Construída	0	-4.170,06	-4.091,13	-6.238,26	-4.310,55	-4.829,40
Total de Sequestro - Mg de C	-44.429,09	-44.429,09	27.454,85	-364,50	17.453,87	42.847,64

As maiores emissões vieram das formações savânicas-florestais (-185.169,27 Mg de C), vegetação aluvial (-21.148,65 Mg de C) e silvicultura (-4.112,99 Mg de C), devido ao desmatamento e plantio de eucalipto. De 2009 a 2015, houve um aumento no sequestro de carbono, totalizando 27.454,85 Mg de C, com destaque para silvicultura (43.322,30 Mg de C) e vegetação aluvial (11.250,09 Mg de C). De 2015 a 2021, o sequestro foi negativo, com emissões de -364,50 Mg de C, principalmente na pastagem. A previsão para 2021-2033 indica um sequestro de 17.453,87 Mg de C, liderado por vegetação aluvial (22.541,49 Mg de C) e silvicultura (15.383,42 Mg de C). Entre 2021 e 2051, espera-se um sequestro total de 42.847,64 Mg de C, principalmente em vegetação aluvial e silvicultura. As análises indicam que, a partir de 2021, haverá um aumento no estoque de carbono no cenário de continuidade de mudanças atuais até 2033 e 2051. O Gráfico 1 apresenta a Análise Monetária do Sequestro de Carbono na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS), mostrando a relação entre o sequestro de carbono e seu valor monetário.

Gráfico 1. Sequestro de Carbono e Valor presente líquido, no cenário de CMA.



A análise do Gráfico 1 apresenta uma perda monetária de -1.057.395,38 US\$ no valor presente líquido do carbono entre 1984 e 2009. De 2009 a 2015, houve um aumento para 657.765,22 US\$, mas entre 2015 e 2021, o valor caiu para -8.732,78 US\$. No cenário de continuidade de mudanças atuais (CMA), o valor presente líquido aumenta em 417.285,12 US\$ de 2021 a 2033 e chega a 1.017.980,71 US\$ em 2051

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro (MS) revelou mudanças significativas no uso da terra entre 1984 e 2021. A cobertura de Formação Savânica-Florestal caiu drasticamente de 40,49% para 13,48%, e essa tendência de redução deve continuar, pode-se chegar a cerca de 12% em 2051. Em contraste, a área destinada à Silvicultura cresceu de 23,76% em 2009 para 42,13% em 2021, e deve continuar a crescer, representando aproximadamente 35% em 2033 e 38% em 2051.

O estoque de carbono estocado no solo, que era de cerca de 1.710.600,81 Mg em 1984, caiu para 1.666.990,63 Mg em 2009, mas deve aumentar para 1.711.252,70 Mg em 2033 e 1.736.646,00 Mg em 2051 devido à expansão da silvicultura. Entretanto, o sequestro de carbono foi negativo de 1984 a 2009, indicando uma perda líquida de carbono para a atmosfera, principalmente devido ao desmatamento e mecanização agrícola. De 2009 a 2015, houve um aumento significativo no sequestro de carbono, mas o período de 2015 a 2021 viu uma nova perda de carbono. A previsão é de que o sequestro de carbono totalize 17.453,87 Mg de 2021 a 2033 e 42.847,64 Mg de 2021 a 2051.

Financeiramente, a valoração monetária do carbono para 2021 a 2033 é de 417.285,12 US\$, aumentando para 1.017.980,71 US\$ de 2021 a 2051 no cenário CMA.

Diante desse cenário, a conservação do solo é crucial para equilibrar o clima e sustentar o ecossistema, pois o solo armazena grande quantidade de carbono. Recomenda-se a adoção de técnicas conservacionistas e um gerenciamento eficaz dos estoques de carbono para mitigar as mudanças climáticas. Analisar e prever os estoques de carbono é essencial para entender essa dinâmica e orientar políticas de gestão sustentável, avaliando a eficácia das estratégias contra as mudanças climáticas, a fim de contribuir para o desenvolvimento sustentável e a preservação dos recursos naturais no Mato Grosso do Sul e no Brasil. As previsões futuras enfatizam a necessidade de preservar áreas de vegetação aluvial, que são essenciais para a proteção dos cursos d'água e prevenção da

erosão do solo. Portanto, deve-se alinhar a relação da sociedade com a natureza, de acordo com a Agenda 2030 dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

Palavras-chave: Modelagem de carbono; Valoração ambiental; Serviços ecossistêmicos; Sequestro de carbono; Mato Grosso do Sul.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo nº 403993/2021-0 e processo nº 313303/2023-1), pela Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso do Sul - FUNDECT (processo nº 71/002.368/2022), pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC-Brasil.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D. C. *et al.* **Dinâmica do uso do solo e valoração de serviços ecossistêmicos: notas de orientação para políticas ambientais.** Desenvolvimento e Meio ambiente, n. 25, p. 53-71, jan. /jun. 2012. Editora UFPR.
- BACANI, V. M. *et al.* Carbon storage and sequestration in a eucalyptus productive zone in the Brazilian Cerrado, using the Ca-Markov/Random Forest and InVEST models, **Journal of Cleaner Production**, Volume 444, 2024; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141291>. Acesso em: 13 ago. 2024.
- CHAPLIN-KRAMER, R. *et al.* **Spatial patterns of agricultural expansion determine impacts on biodiversity and carbon storage.** Proceedings of the National Academy of Sciences Jun 2015, 112 (24) 7402-7407; DOI: 10.1073/pnas.1406485112. Acesso em: 13 jun. 2022.
- COSTANZA, R., d'Arge, R., de GROOT, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature** 387, 253–260 (1997). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/387253a0>. Acesso em: 13 jun. 2022.
- ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL. **DECRETO Nº 15.798, DE 3 DE NOVEMBRO DE 2021.** Regulamenta o Registro Público Voluntário de Emissões Anuais de Gases de Efeito Estufa e a Comunicação Estadual, previstos na Política Estadual de Mudanças Climáticas, previstos na **Lei Estadual nº 4.555, de 15 de julho de 2014**, e dá outras providências. Diário Oficial nº 10.671, de 4 de novembro de 2021.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Soils for nutrition:** state of the art. Rome, 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0900en>

FAMASUL. <https://portal.sistemafamasul.com.br/noticias/mato-grosso-do-sul>

HACKBART, V.C.S. Serviços ecossistêmicos hídricos em paisagens florestais fragmentadas: um caminho para a conservação da Mata Atlântica. 2016. 130f. Tese (Doutorado) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)** Clim Chang 2014 Mitig Clim Chang. 2015; 811–922. 10.1017/cbo9781107415416.017.

InVEST. Manual. **Carbon Storage and Sequestration**. Disponível em: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/carbonstorage.html#the-model>. Acesso em: 13 jun. 2022.

IPCC (2019). Intergovernmental Panel on Climate Change. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>. Acesso em: 10 jun. 2022.

LIANG, X. *et al.* **Patch-generating Land Use Simulation model V1.25 (PLUS) Use's Manual**. School of Geography and Information Engineering, Chuna University of Geosciences, Wuhan, China, 2022.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MEA. 2005. **Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis**. Washington, Island Press, 137p.

OLIVEIRA, G. A. de; SILVA, L. F. da; AGOSTINHO P. R.; [*et al.*]. **Valoração econômica de sequestro de carbono em sistemas agroflorestais biodiversos no bioma cerrado**. In: Agroecologia: métodos e técnicas para uma agricultura sustentável. V. 5, p. 356 – 366, 2021. Disponível em: <https://www.editoracientifica.org/articles/code/210504459>. Acesso em: 30 jun. 2022.

SAMPAIO, B. D. S. **Modelagem Preditiva, Avaliação e Valoração de Serviços Ecossistêmicos de Estoque e Sequestro de Carbono na Bacia Hidrográfica do Córrego Bebedouro, Mato Grosso do Sul, Brasil**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus de Três Lagoas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Três Lagoas, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/6761>. Acesso em 30 de jun. de 2024.

SHARP, R. *et al.* **InVEST Version 3.7.0 User's Guide: The Natural Capital Project**. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. 2018. Disponível em: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/>. Acesso em 30 de ago. de 2023.