SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO
CAMPUS DE NOVA XAVANTINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO

ESTIMATIVA E VALORAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO DA VEGETAÇÃO SAVÂNICA NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA

João Victor Almeida Amorim Gomes

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação da Universidade do Estado de Mato Grosso - *Campus* de Nova Xavantina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ecologia e Conservação.

Orientador: Dr. Paulo Sérgio Morandi
Coorientador: Dr. Claudinei Oliveira dos Santos

Nova Xavantina-MT
Março, 2023

SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO
CAMPUS DE NOVA XAVANTINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO

ESTIMATIVA E VALORAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO DA VEGETAÇÃO SAVÂNICA NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA

João Victor Almeida Amorim Gomes

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação da Universidade do Estado de Mato Grosso - *Campus* de Nova Xavantina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ecologia e Conservação.

Orientador: Dr. Paulo Sérgio Morandi
Coorientador: Dr. Claudinei Oliveira dos Santos

Nova Xavantina-MT
Março, 2023

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

This study was partially funded by CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brazilian Ministry of Education) – Finance code 001.

FICHA CATALOGRÁFICA:

Walter Clayton de Oliveira CRB 1/2049

G633e

GOMES, João Victor Almeida Amorim.
Estimativa e Valoração do Estoque de Carbono da Vegetação Savânica na Transição Cerrado-Amazônia / João Victor Almeida Amorim Gomes – Nova Xavantina, 2023.
34 f.; 30 cm. (ilustrações) Il. color. (sim)

Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação/Mestrado) – Curso de Pós-graduação Stricto Sensu (Mestrado Acadêmico) Ecologia e Conservação, Faculdade de Ciências Agrárias Biológicas e Sociais Aplicadas, Câmpus de Nova Xavantina, Universidade do Estado de Mato Grosso, 2023.
Orientador: Paulo Sérgio Morandi
Coorientador: Claudinei Oliveira dos Santos

1. Estoque de Carbono. 2. Serviços Ecossistêmicos. 3. Biomassa. 4. Formações Savânicas. 5. Valoração de Carbono. I. João Victor Almeida Amorim Gomes. II. Estimativa e Valoração do Estoque de Carbono da Vegetação Savânica na Transição Cerrado-Amazônia: .

CDU 504.7:631.417.1

TERMO DE APROVAÇÃO

ESTIMATIVA E VALORAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO DA VEGETAÇÃO SAVÂNICA NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA

João Victor Almeida Amorim Gomes

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação da Universidade do Estado de Mato Grosso - *Campus* de Nova Xavantina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ecologia e Conservação.

Aprovado em 8 de março de 2023.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Paulo Sérgio Morandi
(Orientador)
Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT

_____

Profa. Dra. Beatriz Schwantes Marimon
(Membro titular-Interno)
Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT

_____

Prof. Dr. Divino Vicente Silvério
(Membro titular-externo)
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

_____

Prof. Dr. Fernando Elias da Silva
(Membro suplente)
Embrapa Amazônia Oriental - EMBRAPA

_____

Prof. Dr. Wesley Jonatar Alves da Cruz
(Membro suplente)
Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT

A minha querida avó Neite Nunes Tavares, a quem tenho tanto o orgulho em chamar de mãe, dedico.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 2
2. MATERIAL E MÉTODOS 3
2.1. Área de estudo 3
2.2. Classificação da cobertura da terra e tipos de vegetação 4
2.3 Definição das classes de uso proporção de ocupação 5
2.4 Estimativa do Estoque de Carbono na transição 5
2.5 Processamento e teste de precisão do mapa oficial de carbono para o Brasil 7
2.6 Valoração do estoque de carbono 7
3. RESULTADOS 8
4. DISCUSSÃO 12
5. CONCLUSÃO 16
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 16

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo na transição entre os biomas Cerrado e Amazônia (TCA) e das parcelas de referência utilizadas para a validação dos dados de vegetação e de carbono na transição.....4

Figura 2: Mapa das classes de uso e ocupação do solo da região de transição mapeadas para o ano de 2020.....8

Figura 3: Intrusões da vegetação natural na transição entre o Cerrado (CE) e a Amazônia (AM) que ocorrem além dos limites oficiais que separam os respectivos biomas (A, B, C e D) e complexidade da vegetação baseado nos pontos de localização das parcelas de referência (E, F, G e H).....9

Figura 4: Modelos lineares entre os dados de carbono interpolados no mapa O16 e os dados coletados em campo em (A) parcelas de cerrado típico (CT) e (B) parcelas de formações florestais (FO).....10

Figura 5: Modelos lineares entre os dados de carbono estimados em e NDVI nas parcelas de cerrado típico (A) e florestais (C) e entre os dados de carbono resultantes do O16 e NDVI nas parcelas de cerrado típico (B) e florestais (D).....10

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parcelas utilizadas neste estudo como referência para a estimativa do estoque de carbono coletado em campo e o carbono extraído na mesma localização geográfica a partir do mapa O16.....6

Tabela 2: Uso e ocupação do solo na transição Cerrado-Amazônia no ano de 2020.....10

RESUMO

Embora a transição entre os biomas Cerrado e Amazônia seja descrita como a mais extensa região ecotonal entre savana e floresta do mundo, pouco se sabe a respeito dos serviços ecossistêmicos provisionados por seus ecossistemas naturais, como o estoque de carbono. Nosso objetivo foi mapear a cobertura natural remanescente da transição Cerrado-Amazônia, avaliar o estoque de carbono da parte aérea da vegetação tipicamente savânica, estimar seu valor financeiro e testar a funcionalidade do mapa oficial de carbono do Brasil, o O16. Para isso, geramos um mapa de vegetação manualmente categorizado para o ano de 2020, com base na coleção 6 do MapBiomas, para avaliar quantos hectares de formações savânicas ocorrem na transição. Estimamos o estoque de carbono a partir da interpolação de dados de um conjunto de parcelas de cerrado típico e adotamos o preço médio do dólar praticado pela tonelada de carbono equivalente (U$/tCO2eq), com base na plataforma brasileira Precificação de Carbono, para a valoração. Nossos resultados demonstraram que o O16 não apresentou viabilidade para estimar o estoque de carbono da vegetação savânica da transição. No entanto, evidenciamos a importância das formações savânicas não apenas para a composição florística da transição, por ocupar uma área excedente a 27 milhões de hectares, mas também para o ciclo do carbono nacional, por estocar mais de 435 milhões de toneladas de carbono, correspondendo a um valor superior a R$ 62 bilhões de reais, tornando a região atrativa para o desenvolvimento de projetos de pagamento por serviços ambientais que visem a conservação de seus ecossistemas naturais.

Palavras-chave: estoque de carbono; serviços ecossistêmicos; biomassa; formações savânicas; valoração de carbono.

ABSTRACT

Although the transition between the Cerrado and Amazon biomes is described as the most extensive ecotonal region between savanna and forest in the world, little is known about the ecosystem services their natural ecosystems provide, such as carbon storage. Our objective was to map the remaining genuine cover of the Cerrado-Amazon transition, evaluate the carbon stock of the aerial part of typically savannah vegetation, estimate its financial value, and test the functionality of the official carbon map of Brazil, O16. For this, we generated a manually categorized vegetation map for 2020, based on MapBiomas collection 6, to assess how many hectares of savannah formations occur in the transition. We estimated the carbon stock by interpolating data from typical Cerrado plots. We adopted the average dollar price practiced per ton of carbon equivalent (U$/tCO2eq), based on the Brazilian platform Precificação de Carbono, for the valuation. Our results demonstrated that O16 was not feasible to estimate the carbon stock of the transition savannah vegetation. However, we show the importance of savannah formations not only for the floristic composition of the transition, as they occupy an area of over 27 million hectares, but also for the national carbon cycle, as they store more than 435 million tons of carbon, corresponding to a value of more than R$ 62 billion of real, making the region attractive for the development of payment projects for environmental services aimed at the conservation of its natural ecosystems.

Keywords: carbon stock; ecosystem services; biomass; savanna formations; carbon valuation.

1. INTRODUÇÃO

Os serviços ecossistêmicos (SE) podem ser conceitualmente descritos como complexos processos ambientais responsáveis por promover a manutenção dos ecossistemas naturais e beneficiar, direta e/ou indiretamente, a qualidade e bem-estar da vida humana (COSTANZA et al., 1997). Diante de sua popularização e do reconhecimento de sua importância para a humanidade, estudos focados em identificar, mapear e valorar os serviços prestados por ecossistemas naturais tornaram-se mundialmente mais frequentes no decorrer das últimas décadas (VIGLIZZO et al., 2012; BHATTA et al., 2014). Apesar disso, poucos estudos voltados para a temática de SE no Brasil têm sido direcionados aos ecossistemas tipicamente savânicos do Cerrado, especialmente na compreensão do potencial de suas fitofisionomias, como o cerrado típico, em estocar e sequestrar carbono (ROQUETTE, 2018; MASSETTI; GIL, 2020; RESENDE et al., 2021).

O estoque de carbono é um dos SE mais abordados globalmente em acordos internacionais e projetos de pagamento por serviços ambientais (PSA), em razão de seu elevado potencial para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e conter os avanços das mudanças climáticas globais (SCHOMERS; MATZDORF, 2013). No entanto, esse SE também tem sido um dos mais afetados por ações antropogênicas nas últimas décadas (ZENG et al., 2019), sobretudo no Cerrado, por se tratar de um dos biomas mais impactados pela degradação ambiental (BARR et al., 2011; STRASSBURG et al., 2017), o que vêm ameaçando drasticamente a preservação e a provisão desse e outros importantes SE (LAHSEN et al., 2016).

Além de ser internacionalmente reconhecido como um *hotspot* natural de diversidade genética e ser a savana de maior biodiversidade mundial (MEYERS et al., 2000; SILVA-JUNIOR et al., 2021), o Bioma Cerrado também desempenha um papel imprescindível no ciclo do carbono global por atuar como um importante sumidouro natural de CO_2 atmosférico (LOPES; MIOLA, 2010; CARNEIRO et al., 2019). Apesar disso, o potencial de sua vegetação tipicamente savânica para estocar carbono ainda tem sido bastante subestimado (ROQUETTE, 2018), recaindo sobre as florestas tropicais um maior enfoque (ESQUIVEL-MUELBERT et al., 2020; GATTI et al., 2020; HUBAU et al., 2020; LI et al., 2022).

Devido a conversão de aproximadamente 55% da cobertura natural do Cerrado para outros usos do solo (STRASSBUGR et al., 2017), tem-se observado um declínio progressivo de sua capacidade para estocar e sequestrar carbono, passando a atuar também

como uma importe fonte de emissão de GEE (BATLLE-BAYER et al., 2010; SILVA-JUNIOR et al., 2020). Este cenário tem sido especialmente agravado na transição entre os biomas Cerrado e Amazônia (TCA), uma região historicamente afetada por contínuos processos antropogênicos associados a elevados índices de desmatamento, incêndios indiscriminados, forte exploração madeireira por corte seletivo e intensa conversão da vegetação nativa em detrimento de rápidas mudanças na cobertura do solo (NOGUEIRA et al., 2007; MATRICARDI et al., 2010; MARQUES et al., 2020), o que tem resultado em uma severa degradação de seus ecossistemas florestais e, principalmente, savânicos (MARIMON et al., 2014; WANG et al., 2019; MARQUES et al., 2020).

A mitigação dos impactos gerados pela antropização dos ecossistemas naturais tem se mostrado um dos principais desafios para a humanidade na atualidade (PETERS et al., 2013; SARKODIE et al., 2022), especialmente na região da TCA (MARQUES et al., 2020; MARENGO et al., 2022). Diante disso, a valoração de SE, como o estoque de carbono, tem se mostrado uma relevante alternativa político-econômica e conservacionista atual para conter os avanços da degradação ambiental mundial, por possibilitar investigar a vulnerabilidade dos ecossistemas naturais e corroborar para a compreensão dos diversos fatores que impulsionam sua degradação, auxiliando assim em tomada de decisões para implantação de políticas de conservação mais efetivas (RAO et al., 2015).

Apesar de a TCA figurar uma região estratégica para a compreensão dos SE do Cerrado e da Amazônia, pouco se sabe a respeito do real potencial de sua vegetação savânica em estocar carbono, para além de estimativas realizadas em parcelas de 1 hectare (MARIMON et al., 2014; MORANDI et al., 2020), dificultando a valoração desse SE. Portanto, o mapeamento, estimativa e a valoração do estoque de carbono da vegetação tipicamente savânica da TCA poderá auxiliar diretamente no planejamento e elaboração de políticas públicas que visem a conservação de seus ecossistemas naturais e a continuidade de provisão dos diversos SE essencialmente prestados pelas formações savânicas ao longo de toda a transição.

Em vista das problemáticas associadas as estimativas do estoque de carbono em áreas territorialmente extensas, como a TCA, uma série de mapas foram desenvolvidos nos últimos anos a fim de auxiliar nas estimativas espaciais do acúmulo de biomassa e estoque de carbono acima do solo para todo o território nacional (SAATCHI et al., 2011; BACCINI et al., 2012; NOGUEIRA et al., 2015; ENGLUND et al., 2017; SULLIVAN et al., 2017). Um mapa oficial de carbono para o Brasil, produzido por Englund et al. (2017) a partir da interpolação de dados coletados da área basal com valores médios de biomassa

da vegetação estimados em parcelas de 0,5 a 1 ha, estabelecidas pelo RADAMBRASIL e combinados com mapas de vegetação produzidos posteriormente pelo IBGE (2019), foi apresentado à UNFCCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima), com o intuito de auxiliar nas medições do estoque nacional de carbono.

Por apresentar uma alta resolução espacial e abranger todo o território brasileiro, o mapa O16 representa a melhor e mais atual base de dados para estimar espacialmente o estoque de carbono da vegetação natural no país (ENGLUND et al., 2017). No entanto, por ter sido calibrado em dados de vegetação florestal do Bioma Amazônia e não considerar o *status* de preservação, conservação e degradação das parcelas, ainda não se sabe o quão representativo esse mapa pode ser do estoque atual de carbono da vegetação savânica da transição Cerrado-Amazônia, uma vez que o potencial de tais mapas para gerar estimativas precisas do estoque de carbono em áreas extensas, heterogêneas e ecologicamente complexas, como a TCA, também é incerto.

A TCA é considerada uma região com características próprias, principalmente pela vegetação savânica e florestal que se interpenetram formando mosaicos (RATTER et al., 1973; MARIMON et al., 2014; MARQUES et al., 2020), e isso nos permite acreditar que analisar suas fronteiras contribuirá para melhorar a compreensão das interações ecossistêmicas entre o Cerrado e a Amazônia, bem como o potencial de sua vegetação savânica remanescente em atuar como sequestradora de carbono. Diante disso, nossos objetivos centrais consistiram em mapear a região da TCA e sua vegetação natural remanescente em 2020, bem como estimar e valorar o estoque de carbono em áreas compostas por formações savânicas da transição, visando responder as seguintes perguntas: *i)* quanto de cobertura natural tipicamente savânica ainda ocorre na transição? *ii)* qual o valor financeiro do estoque de carbono sequestrado pela vegetação savânica da transição? *iii)* o mapa de carbono oficial do Brasil apresenta viabilidade para estimar o estoque de carbono de vegetação caracteristicamente savânica em áreas ecologicamente complexas como a transição?

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Nossa área de estudo compreende toda a extensão da zona de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, definida a partir de um *buffer* de 200km de seus limites oficiais (IBGE, 2019) com base na metodologia proposta por Marques et al. (2020) e na observação de dados de vegetação levantados em campo (REIS et al., 2018; MORANDI et

al., 2020), resultando em uma extensa região composta por sete estados brasileiros: Mato Grosso, Rondônia, Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão e Piauí (Figura 1).

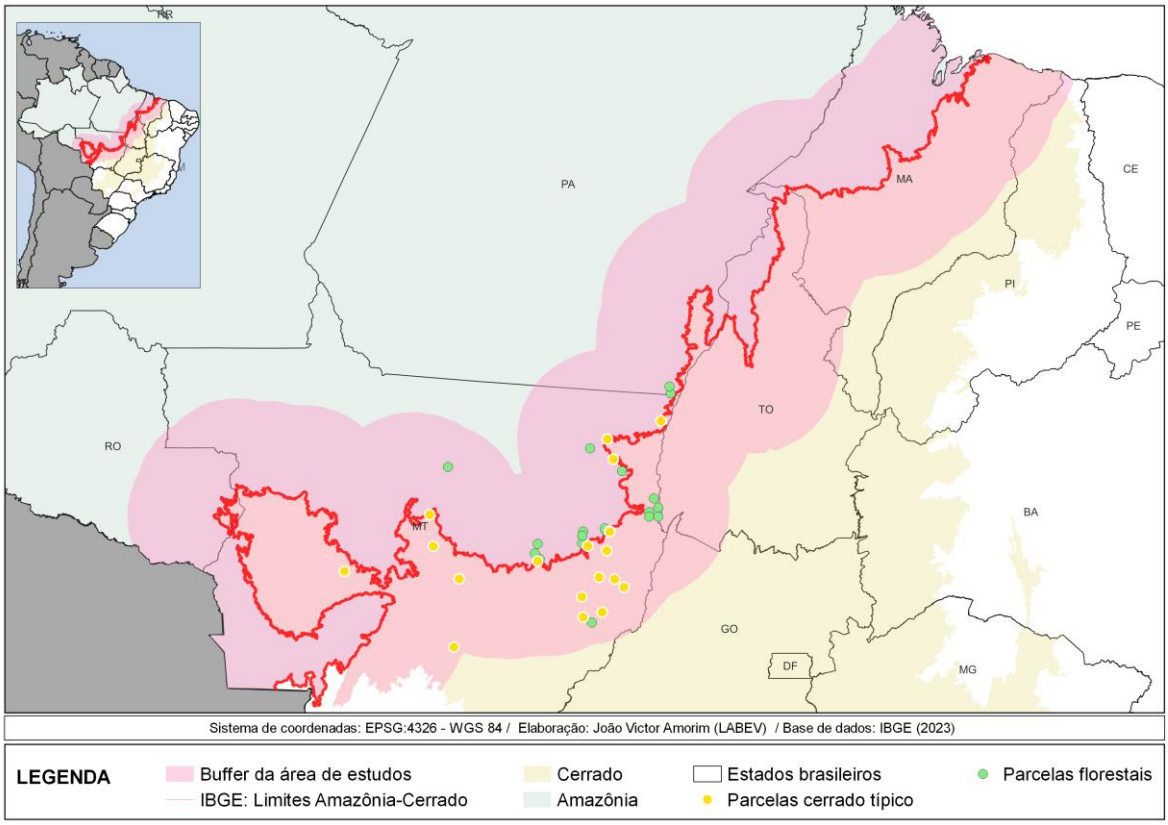


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo na transição entre os biomas Cerrado e Amazônia (TCA) e das parcelas de referência utilizadas para a validação dos dados de vegetação e de carbono na transição.

2.2 Classificação da cobertura da terra e tipos de vegetação

Para a classificação da cobertura da terra e dos tipos de vegetação da TCA, utilizamos dados de sensores remotos, como o *Thematic Mapper* ™, *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) e *Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor* (OLI-TIRS), provenientes de um mosaico de coleções *Landsat* que alimentam a coleção 6 do projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomas, https://mapbiomas.org/), integrados a plataforma *Google Earth Engine* (GoogleEE). Esses dados dispõem de um processamento otimizado em nuvem por algoritmos de aprendizado do GoogleEE e monitoramento supervisionado e classificação automática pelo método "Random Forest", sendo especialmente eficiente em mapeamentos de maior escala (PARENTE et al., 2019). As imagens foram obtidas em formato GeoTiff, com resolução

de 30 m e classificação georreferenciada no sistema de coordenadas UTM Datum WGS84, para o ano de 2020, que corresponde ao período de cobertura final da coleção 6 do MapBiomas e, portanto, o dado temporal mais atual dessa coleção.

2.3 Definição das classes de uso e proporção de ocupação

No GoogleEE, reprojetamos as classes de cobertura da terra originalmente abrangidas pela coleção 6 do MapBiomas (mapbiomas.org/codigos-de-legenda) para gerar um arquivo *raster* com 5 classes de uso do solo, o que resultou em um mapa de cobertura da terra para o ano de 2020 com as seguintes classes: 1) Formação florestal (floresta ombrófila densa, estacional sempre-verde, ombrófila aberta, estacional semidecidual, estacional decidual, floresta ombrófila aberta aluvial, mata ciliar, mata de galeria, mata seca e cerradão); 2) Formação savânica (cerrado sentido restrito: cerrado denso, cerrado típico, cerrado ralo e cerrado rupestre); 3) Outras formações naturais (afloramento rochoso, apicum, restinga arborizada; formação campestre: savana, savana parque, savana-estépica, savana gramíneo-lenhosa, campinarana, campo sujo, campo limpo, campo rupestre; campo alagado: campo úmido, parque de cerrado, vereda, palmeiral; mangue). 4) Áreas não vegetadas (outras áreas não vegetadas, aquicultura, rios e lagos). 5) Áreas antropizadas (pastagem, mineração, área urbana; agricultura: lavoura temporária, plantio de soja, cana-de-açúcar, arroz, outras lavouras temporárias, lavoura perene, café, citrus, outras lavouras perenes; silvicultura: pinus, eucalipto, araucária).

Para quantificar a proporção de ocupação das classes de uso do solo e estimar quanto de área tipicamente savânica ocorre na TCA, utilizamos o *software* de modelagem gratuito Dinâmica EGO (versão 7.1.1) (https://csr.ufmg.br/dinamica/), cujo cálculo é feito pela razão entre a quantidade de *pixels* existentes em uma classe de uso do solo em relação ao período temporal analisado (e.g. a quantidade de *pixels* da classe de formação savânica no ano de 2020, expresso em hectares), considerando para isso as covariáveis contínuas manualmente categorizadas e o tamanho do intervalo adotado, que neste estudo foi de 1 (NOGUEIRA, 2022). A porcentagem de ocupação de uma classe, por sua vez, foi inferida pela razão entre seu valor dividido pela soma de todas as classes de uso do solo.

2.4 Estimativa do estoque de carbono na transição

Para estimar o estoque de carbono acima do solo da vegetação florestal e savânica da TCA, nos baseamos em estimativas realizadas em dados de 29 parcelas de campo (Tabela 1), sendo 14 representadas por cerrado típico e 15 por formações florestais

(floresta estacional semidecidual, floresta estacional perenifólia e floresta ombrófila), e na aplicação de um mapa de carbono oficial para o Brasil, proposto para o ano de 2016 por Englund et al. (2017), que dispõe de uma resolução espacial de 50 m e que abrange todo o território brasileiro. Posteriormente, calculamos a média do estoque de carbono das 29 parcelas de campo e utilizamos a média do estoque de carbono estimado nas 14 parcelas de cerrado típico para a validação do O16 e para o cálculo de extrapolação para toda a classe de formação savânica mapeada para a TCA, multiplicada por 3,67 para a conversão do carbono equivalente. Os dados de carbono das 15 parcelas compostas por formações florestais, por sua vez, foram utilizados apenas para a avaliação da precisão dessa base espacializada de dados de carbono, por ter sido calibrados em dados de vegetação florestal.

Tabela 1: Parcelas utilizadas neste estudo como referência para a estimativa do estoque de carbono coletado em campo e o carbono extraído na mesma localização geográfica a partir do mapa O16.

Autor	Parcela	Fitofisionomia	BAS	CAS	Carbono (O16)	NDVI
Morandi et al. (2020)	TR02	CT	23,2	11,6	35	65,7
Morandi et al. (2020)	TR04	CT	28,2	14,1	20	53,1
Morandi et al. (2020)	TR07	CT	19,4	9,7	23	81,6
Morandi et al. (2020)	TR08	CT	18,2	9,1	50	56,3
Morandi et al. (2020)	TR10	CT	31,5	15,7	25	64,3
Morandi et al. (2020)	TR11	CT	25,2	12,6	30	56,9
Morandi et al. (2020)	TR13	CT	23,3	11,6	46	50,4
Morandi et al. (2020)	TR14	CT	34,3	17,1	56	73,1
Morandi et al. (2020)	TR16	CT	82,1	41,0	25	82,7
Morandi et al. (2020)	TR17	CT	47,1	23,5	26	62,2
Morandi et al. (2020)	TR18	CT	50,3	25,1	56	62,5
Morandi et al. (2020)	TR19	CT	55,6	27,8	37	80,9
Morandi et al. (2020)	TR20	CT	34,1	17,0	35	75,0
Morandi et al. (2020)	TR21	CT	38,1	19,0	24	75,0
Reis et al. (2018)	FLO-01	FEP	111,1	55,5	39	77,7
Reis et al. (2018)	FLO-02	FEP	144,7	72,3	47	84,8
Reis et al. (2018)	GAU-02	FES	91,7	45,8	46	80,2
Reis et al. (2018)	GAU-04	FTP	145,8	72,9	46	79,0
Reis et al. (2018)	GAU-05	FTP	250,2	125,1	30	81,8
Reis et al. (2018)	GAU-06	FTP	176,9	88,4	32	64,3
Reis et al. (2018)	SAA-01	FES	187,7	93,8	80	88,5
Reis et al. (2018)	SAA-02	FES	166,3	83,1	95	89,6
Reis et al. (2018)	SIP-01	FOA	79,2	39,6	96	85,5
Reis et al. (2018)	TAN-02	FEP	143,5	71,7	96	79,3
Reis et al. (2018)	TAN-03	FEP	127,4	63,7	71	76,2
Reis et al. (2018)	TAN-04	FEP	138,3	69,1	76	86,6
Reis et al. (2018)	VCR-02	FES	196,8	98,4	63	80,0
Reis et al. (2018)	FRP-01	FEP	135,1	67,5	60	85,9

Reis et al. (2018)	POA-01	FEP	140,1	70,0	60	87,3

BAS: biomassa acima do solo; CAS: carbono acima do solo, ambos coletados em campo; NDVI: Índice de Vegetação de Diferença Normalizada; CT*:* cerrado típico; FOA: floresta ombrófila aberta; FTP: floresta estacional perenifólia em terra preta de índio; FES: floresta estacional semidecidual; FEP: floresta estacional perenifólia.

2.5 Processamento e teste de precisão do mapa oficial de carbono para o Brasil

O mapa de carbono O16, obtido em formato GeoTiff, foi reprojetado para o sistema de coordenadas UTM DATUM WGS84 e recortado para os limites da TCA a partir do *buffer* de 200 km. Utilizamos o *software* Dinâmica EGO para cruzar as informações do O16 com o mapa de cobertura da terra gerado para o ano de 2020, visando atribuir o valor do estoque de carbono acima do solo para a vegetação nas classes de formação florestal (1) e savânica (2) mapeadas para a TCA. Para avaliar a precisão do O16 em gerar estimativas espaciais do estoque de carbono em áreas mais locais e em uma escala mais fina, empregamos análises de correlação bivariada dos dados de carbono obtidos a partir de sua aplicação e dos dados de carbono de campo, baseado em 14 parcelas de cerrado típico e 15 parcelas florestais. Também, aplicamos um Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) para avaliar se a densidade da vegetação capturada espacialmente se correlaciona com os dados de carbono estimados em campo, com base nas parcelas de cerrado típico, e com os dados gerados a partir do mapa oficial de carbono (O16).

2.6 Valoração do estoque de carbono

Para a valoração do estoque de carbono acima do solo da vegetação tipicamente savânica da TCA, adotamos um preço médio em dólar pela tonelada de carbono equivalente (U$/t$CO_2$eq). Extraímos esse dado da plataforma brasileira DASHBOARD – Precificação de Carbono (https://bit.ly/3AuqBxC), desenvolvida pelo Observatório de Conhecimento Inovação em Bioeconomia (OCBio), da Fundação Getúlio Vargas (FGV), e que reúne informações acerca da cotação das taxas e valores praticados pela tonelada do carbono equivalente de bancos de carbono globais, como o *International Bank for Reconstruction and Development* (IBRD), com valores estimados em U$1,20 na Ásia e U$19,00 na Oceania no ano de 2020. Neste estudo, consideramos a cotação mais atual praticada pela tCO_2eq no mercado de carbono global, refletindo em um valor médio de U$5,4/t$CO_2$eq praticado para áreas de floresta e uso do solo, que pode ser compreendido aqui como o uso do solo pelo próprio ecossistema florestal, assumindo esse valor também

para as áreas de formações savânicas compostas por cerrado típico. Os valores em reais foram baseados na cotação de U$5,17, registrada no dia 21/02/2023.

3. Resultados

3.1.1 Transição Cerrado-Amazônia

Nossos resultados evidenciaram não apenas uma extensa faixa territorial com grandes variações de largura, que variam entre 70 a 360 km em determinados trechos dos limites oficiais que separam o Cerrado da Amazônia, como também um complexo mosaico de formações naturais que se alternam junto a outras classes de uso e cobertura do solo ao longo de toda a paisagem natural da transição (Figura 2).

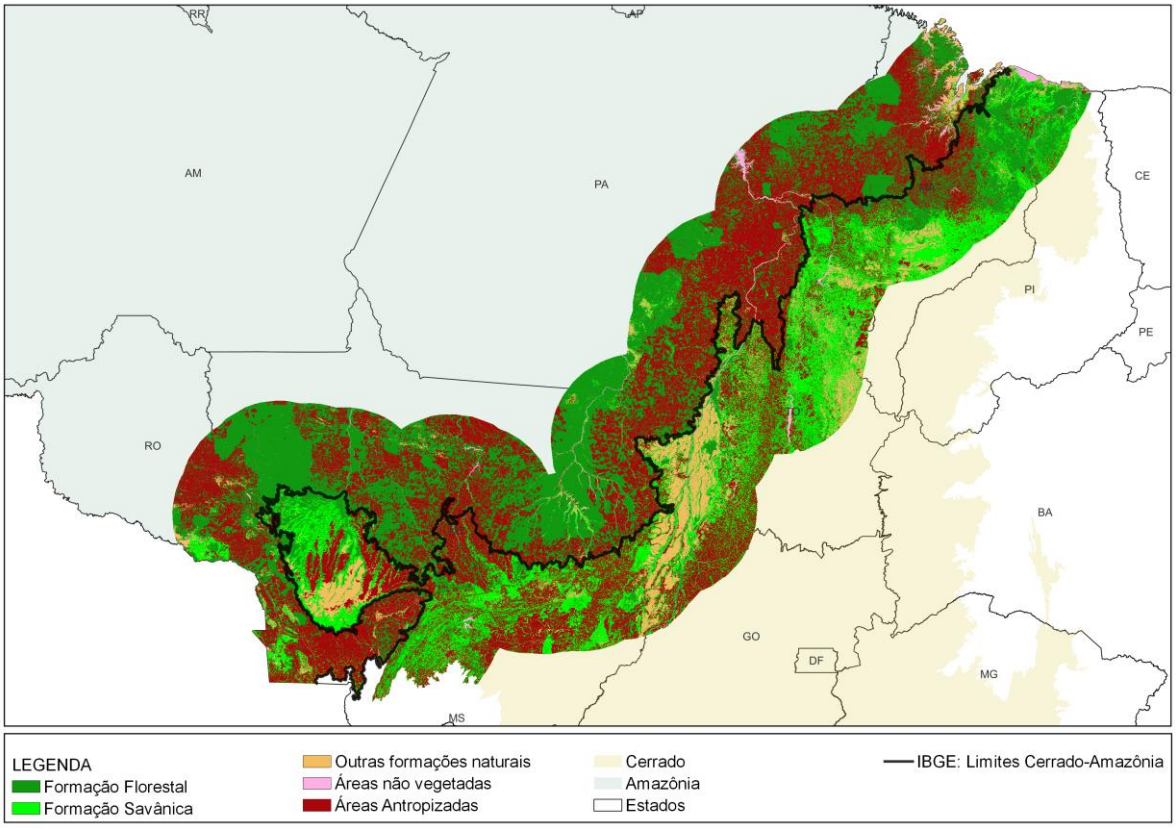


Figura 2: Mapa das classes de uso e ocupação do solo da região de transição mapeadas para o ano de 2020.

As resultados obtidos a partir do mapeamento da cobertura natural da transição, por sua vez, revelaram claras intrusões da vegetação nativa de ambos os biomas para além de seus limites oficiais (Figura 3), tendo sido possível observar projeções da vegetação de grandes fragmentos florestais do bioma Amazônia para dentro dos domínios do bioma Cerrado (Figura 3, B e C) e a ocorrência de vegetação tipicamente savânica em diversos trechos do bioma Amazônia (Figura 3, A e D).

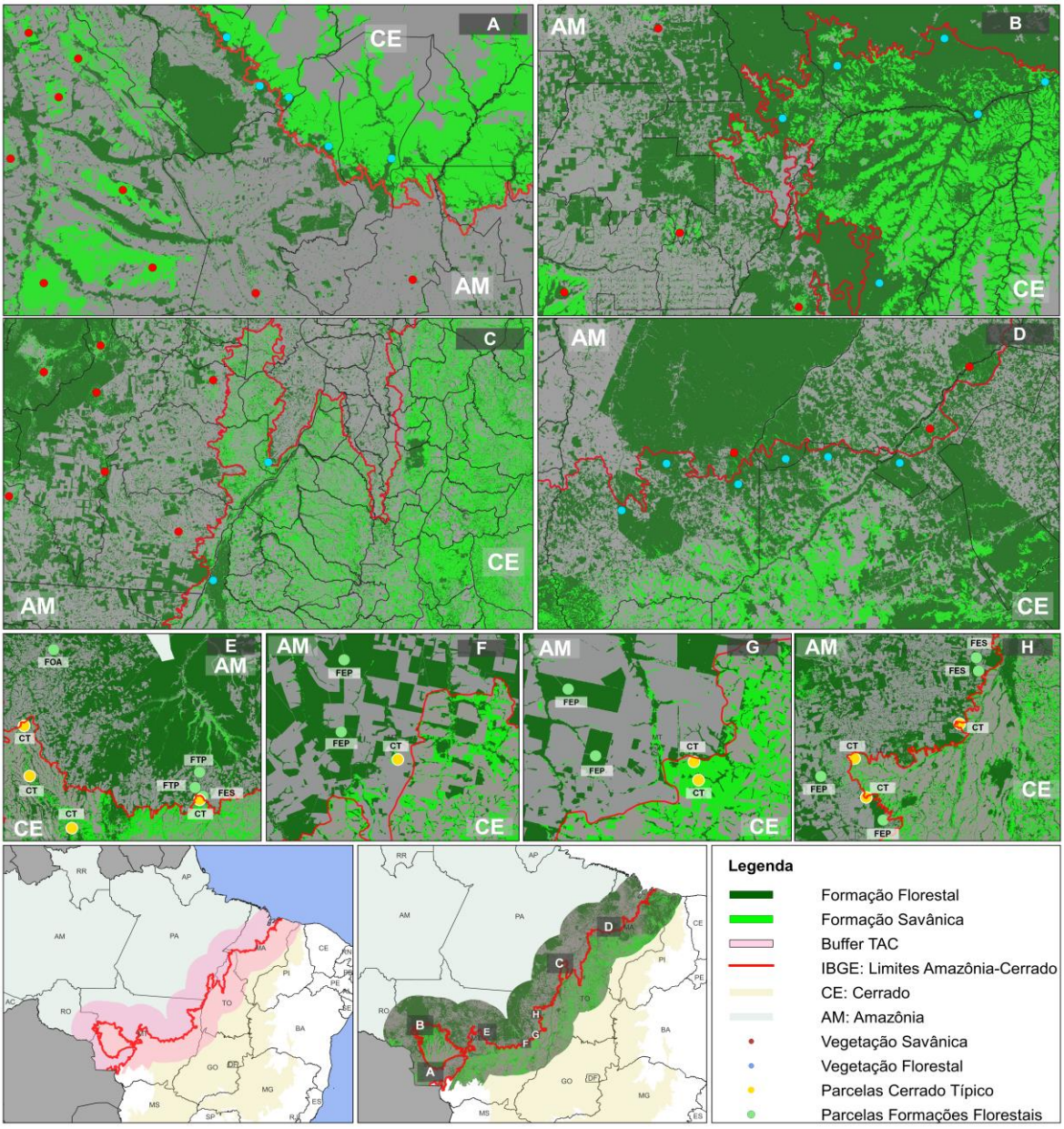


Figura 3: Intrusões da vegetação natural na transição entre o Cerrado (CE) e a Amazônia (AM) que ocorrem além dos limites oficiais que separam os respectivos biomas (A, B, C e D) e complexidade da vegetação baseado nos pontos de localização das parcelas de referência (E, F, G e H).

Em relação a distribuição territorial das classes de uso do solo, em hectares e em porcentagem de ocupação, nossos resultados revelaram que aproximadamente 37% de todo o território da TCA é composto por formações florestais, 17% por formações savânicas, 7% de outras formações naturais, 1% por áreas não vegetadas e 37% de áreas antropizadas (Tabela 2).

Tabela 2: Uso e ocupação do solo na transição Cerrado-Amazônia no ano de 2020.

Classe de uso do solo	Área (ha)	Área (km²)	Ocupação (%)
Formações florestais	59.414.448,9	594.144,489	36.92%
Formações savânicas	27.925.478,3	279.254,783	17.34%
Outras formações naturais	11.652.934,1	116.529,341	7.23%
Áreas não vegetadas	1.944.816,8	19.448,168	1.21%
Áreas antropizadas	60.124.524,4	601.245,244	37.30%
Total	161.062.202,00	1.610.622,03	100%

3.1.2 Avaliação do desempenho do O16

O teste de precisão realizado a partir das parcelas de cerrado típico demonstrou que essa base de dados não apresentou uma correlação positiva com os dados de carbono estimados em campo (R^2 = -0,07; p= 0,75) (Figura 4A). Por outro lado, o O16 apresentou correlação positiva entre os dados de carbono estimados espacialmente e em campo nas parcelas compostas por vegetação florestal (R^2 = -0,08; p < 0,32) (Figura 4B).

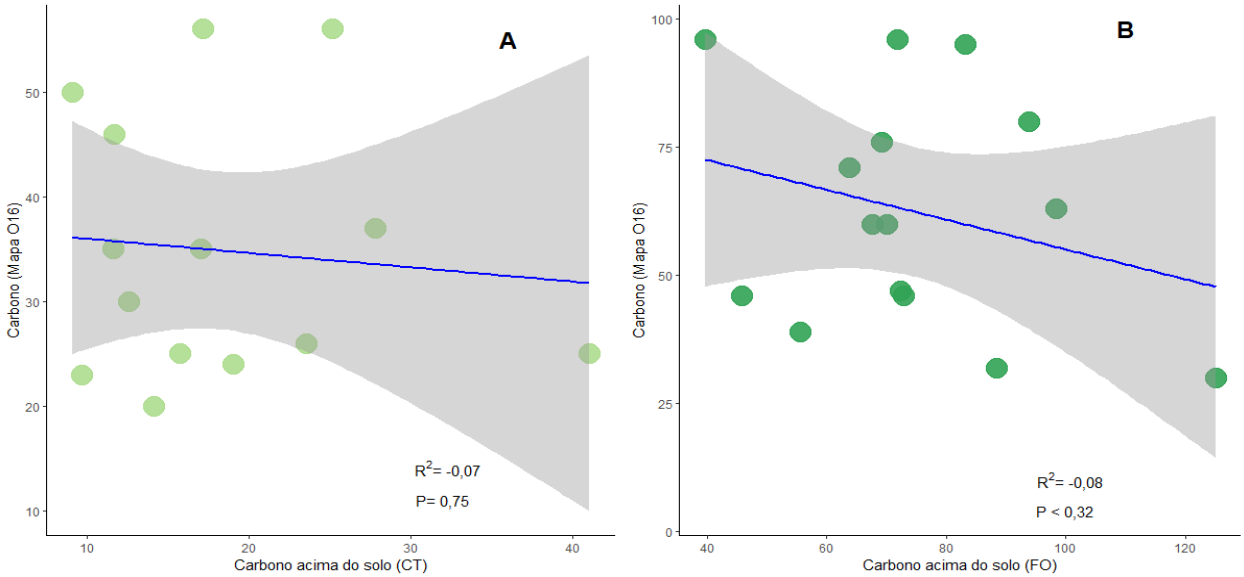


Figura 4: Modelos de correlação bivariada entre os dados de carbono interpolados no mapa O16 e os dados coletados em campo em (A) parcelas de cerrado típico (CT) e (B) parcelas de formações florestais (FO).

Embora o NDVI, por sua vez, tenha apresentado uma leve tendência com os dados de carbono estimados em campo nas parcelas de cerrado típico, essa tendência não foi suficiente para expressar uma correlação significativa entre os dados (Figura 5A; R^2 = 0,20; p = 0,06). Também não foi observado uma correção significativa entre NDVI e os dados de carbono estimados em campo nas parcelas florestais (Figura 5B; R^2 = -0,07; p = 0,84). Apesar de não termos observado uma correlação positiva entre o mapa de carbono O16 e NDVI nas parcelas de cerrado típico (Figura 5C; R^2 = -0,04; p = 0,47), verificamos o inverso entre os dados espaciais resultantes da interpolação do mapa de carbono O16 e NDVI para as formações florestais (Figura 5D; R^2 = 0,21; p < 0,05), tendo apresentado uma correlação positiva.

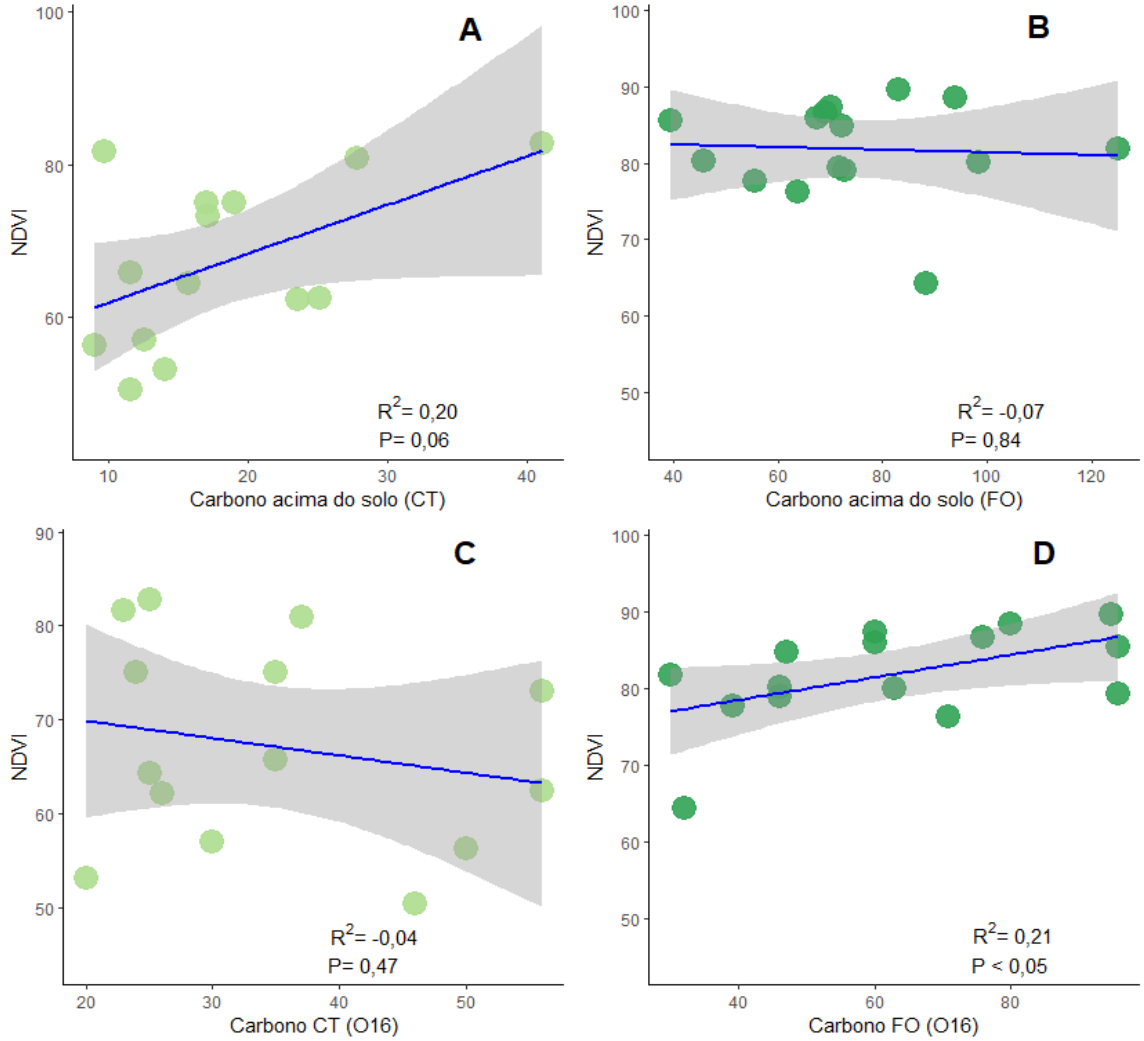


Figura 5: Modelos de correlação bivariada entre os dados de carbono estimados em e NDVI nas parcelas de cerrado típico (A) e florestais (C) e entre os dados de carbono resultantes do O16 e NDVI nas parcelas de cerrado típico (B) e florestais (D).

3.1.3 Estoque de carbono

Nas parcelas de cerrado típico mensuradas em campo, a média de biomassa aérea foi de 31,15 Mg ha^{-1} e a de carbono sequestrado na porção aérea da vegetação foi de 15,58 Mg ha^{-1} que, convertido para tCO_2eq equivale a 57,18 Mg ha^{-1}, correspondendo a um valor de US$ 295.62 por hectare. Por outro lado, o valor médio do estoque de carbono estimado pelo O16, para as mesmas parcelas de cerrado típico, foi de 30,14 Mg ha^{-1} (110,52 Mg ha^{-1} CO_2eq), sendo praticamente o dobro dos dados medidos em campo (Tabela 1).

A extrapolação dos dados de carbono, com base na média do carbono coletado em campo nas parcelas de cerrado típico, demonstra que, caso a vegetação savânica mapeada na transição fosse composta unicamente por essa fitofisionomia, ela seria responsável por estocar mais de 435 milhões de toneladas de carbono. Considerando o valor de US$5.4 pela tCO_2eq no mercado de carbono para áreas de floresta e uso do solo, e assumindo esse valor para áreas compostas de cerrado típico, o valor financeiro dessa mesma vegetação seria equivalente a mais de U$ 12 bilhões pelas emissões evitadas, correspondendo também a quase de R$ 63 bilhões se considerarmos a cotação de U$ 5,17 do dia 21/02/2023.

4. Discussão

Em resposta às perguntas norteadoras deste estudo, nossos resultados demonstraram que (i) a classe de formação natural tipicamente savânica mapeada para a região de transição Cerrado-Amazônia ocupa uma área equivalente a 27.925.478,3 de hectares, (ii) correspondendo a um valor financeiro superior a 12 bilhões de dólares e de quase 63 bilhões de reais pelo estoque de carbono e emissões de GEE evitadas. No entanto, (iii) as simulações espaciais do estoque de carbono da vegetação savânica nativa remanescente da TCA, a partir da aplicação do mapa de carbono O16, proposto por Englund et al. (2017), tornaram evidente que essa base de dados não apresenta viabilidade para o mapeamento desse SE em áreas compostas por formações savânicas na transição.

Com a ajuda de tecnologias mais modernas como os sensores remotos que produzem imagens de alta resolução, disponíveis gratuitamente, e as plataformas integradas MapBiomas e *Google Earth Engine*, geramos um mapeamento detalhado da

TCA que mostra sua ampla dimensão, com pontos de largura de até 360 km. Desse modo, nossos resultados corroboram com as descrições pioneiras de Soares (1953), de que a transição apresenta uma enorme sinuosidade que não pode ser representada facilmente por uma linha divisória.

Assim como as observações botânicas realizadas em campo na região (RATTER et al., 1973; MARIMON et al., 2006; 2014; MORANDI et al., 2016), nossos mapas reforçam padrões que sugerem a complexidade florística da TCA ao expor um mosaico de fitofisionomias, com presença de cerrado típico e florestas estacionais semideciduais, ombrófilas e perenifólias (MARIMON et al., 2006; MORANDI et al., 2018). Além disso, as imagens de alta resolução nos permitiu visualizar claramente as intrusões de vegetação natural de ambos os biomas, para além de seus respectivos limites, ao longo de toda a região, tal qual relatado por Marques et al. (2020) e vários outros importantes estudos pretéritos (e.g. SOARES, 1953; RATTER et al., 1973; MARIMON et al., 2014) em vários trechos da transição. Observamos a presença de formações tipicamente savânicas ocorrendo de forma adjunta a áreas de floresta dentro dos domínios do Bioma Amazônia, em fragmentos de diferentes dimensões. Também registramos o contrário, com formações florestais do Bioma Amazônia que, por vezes, se alternam com a vegetação nativa do Cerrado.

Além de tornar ainda mais evidente a interpenetração da vegetação nativa remanescente na transição, nossos mapas também reforçam apontamentos de estudos anteriores que expuseram condições de avanço e recuo da vegetação ao relatarem incursões de vegetação florestal, mais precisamente de florestas estacionais e cerradão, sobre áreas de vegetação savânica, compostas por cerrado típico, na região da borda Sul-amazônica (RATTER et al., 1973; MARIMON et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2016; PASSOS et al., 2018). Condições edáficas, sazonalidade pronunciada, ausência da passagem do fogo por longos períodos e até mesmo processos históricos ocorridos durante o Holoceno têm sido apontados como alguns dos principais precursores do avanço e recuo da vegetação natural do Cerrado e da Amazônia na transição (WERNECK et al., 2012; OLIVEIRA et al. 2016; MARACAHIPES-SANTOS et al., 2018; PASSOS et al., 2018; RIBEIRO et al., 2023).

A elevada dinâmica estrutural apresentada pela vegetação natural da transição, com taxas aceleradas de mortalidade e de recrutamento (MARIMON et al., 2014; ESQUIVEL-MUELBERT et al., 2020), além de um maior adensamento da vegetação, que reflete em maiores ganhos de biomassa acima do solo tanto em áreas compostas por formações florestais quanto savânicas, são outros indicadores naturais que também podem estar

relacionados ao avanço ou recuo da vegetação natural na TCA ao longo do tempo (MORANDI et al., 2016; PASSOS et al., 2018).

Além disso, o mapeamento da vegetação nativa remanescente da TCA evidenciou também a relevância das formações tipicamente savânicas da região, por ocuparem uma área equivalente a 17.34% de toda a TCA, e para o ciclo do carbono global, por estocar mais de 435 milhões de Mg de carbono, correspondendo a mais de R$ 62 bilhões pela tCO_2eq e emissões de GEE evitadas. Este foi o primeiro estudo que mapeou e atribuiu um valor financeiro ao estoque de carbono para toda a formação savânica da TCA, embora estudos centrados na identificação e valoração de SE não sejam uma novidade no Brasil (SANTOS et al., 2001; FEARNSIDE, 2007; SAMPAIO; WORTMANN, 2014; RESENDE et al., 2017; PERIOTTO; TUNDISI, 2018; ABAD, 2019; BROUWER et al., 2022), incluindo o estoque de carbono (STRAND et al., 2018).

Existem, no entanto, outros estudos que avaliaram o estoque de carbono acima do solo da vegetação do cerrado típico em diferentes regiões do Brasil. Paiva e colaboradores (2011), por exemplo, registraram uma média de 8,60 Mg ha^{-1} para o estoque de carbono acima do solo em parcelas de cerrado típico no Cerrado central do Distrito Federal. Oliveira e colaboradores (2019), registraram uma média de 5,91 Mg ha^{-1} para o estoque de carbono acima do solo em um cerrado típico a partir da biomassa seca da vegetação aérea. Felfili (2008), por sua vez, observou variações na média do estoque de carbono acima do solo ao comparar os dados de diferentes parcelas de cerrado típico, registrando valores entre 3,72 Mg ha^{-1} a 13,27 Mg ha^{-1}. Lopes e Miola (2010), ao compararem o estoque de carbono acima do solo entre diferentes fitofisionomias do Bioma Cerrado, registraram uma média de 3,85 Mg ha^{-1}. Apesar de o valor do estoque de carbono apresentar variações em função de fatores como o uso de diferentes metodologias, condições ambientais locais, tipo, topografia e histórico de uso do solo, fazendo com que seu valor seja potencialmente maior ou menor em diferentes regiões, a média do estoque de carbono acima do solo das parcelas de cerrado típico apresentada neste estudo é similar àquelas registradas na literatura.

Tendo em vista que o acúmulo de biomassa no Bioma Cerrado é mais significativo nas estruturas vegetativas abaixo do solo, quando comparado com a porção aérea da vegetação (ADUAN, 2003; BUSTAMANTE et al., 2012), com registros de raízes em profundidades de até 18 m no solo (RAWITSCHER, 1948; OLIVEIRA et al., 2005), o valor financeiro do estoque de carbono da vegetação savânica da TCA poderia ser quatro vezes maior do que o encontrado neste estudo. Paiva e colaboradores (2011), por exemplo,

estimaram o estoque de carbono de raízes em profundidade de até 2 m, em um Cerrado *sensu stricto* do Distrito Federal, e encontraram um valor equivalente a 22,38 Mg C ha^{-1}. Castro e Kauffmann (1998), ao avaliar o estoque de carbono de raízes na mesma profundidade do solo, registraram valores médios entre 16,3 Mg C ha^{-1}, 30.1 Mg ha^{-1}, 46.5 Mg C ha^{-1} e 52,9 Mg C ha^{-1} em diferentes fitofisionomias savânicas do Cerrado.

Recentemente, Terra e colaboradores (2023), registraram uma média de 123,13 Mg C ha^{-1} para o estoque de carbono em solos de profundidades de até 1 metro no Bioma Cerrado e que, somado ao estoque de carbono de raízes e da parte aérea da vegetação, apresentou uma média geral de 145,62 Mg C ha^{-1}. Dessa forma, acreditamos que, apesar das limitações metodológicas, incluir a valoração do estoque de carbono abaixo do solo em projetos de PSA pode tornar ainda mais importante as iniciativas de conservação dos ecossistemas e dos SE prestados pela vegetação savânica, não só na região da TCA, mas em todo o Bioma Cerrado.

Se considerarmos também o contexto histórico de rápidas mudanças na cobertura de uso da terra em que a TCA está inserida, que resultou em uma expressiva perda de ecossistemas florestais e savânicos nas últimas décadas (MARIMON et al., 2014; MARQUES et al., 2020; MARENGO et al., 2022), é seguro afirmar que o potencial de suas formações savânicas para estocar carbono e, consequentemente, o valor financeiro praticado pela tCO_2eq e emissões de GEE evitadas na região, poderia ser ainda maior do que o estimado neste estudo para o ano de 2020, caso a vegetação natural não tivesse sido drasticamente removida. Isso torna anda mais urgente a necessidade de medidas que promovam a contenção dos avanços da degradação ambiental na transição e a conservação de seus ecossistemas naturais, especialmente os savânicos (MARENGO et al., 2022).

Sabemos que a abertura de novas áreas destinadas a produção agrícola em território nacional não é mais necessária, uma vez que o Brasil já possui áreas suficientes para suprir as demandas do setor agropecuário pelas próximas décadas (STRASSBURG et al., 2014). A estimativa é que existam aproximadamente 140 milhões de hectares de terras degradadas em todo o Brasil, superando em duas vezes o território da França (DE PAULA et al., 2022). A recuperação de áreas que sofreram perturbações, como o reflorestamento de pastagens degradadas abandonadas, também pode ter uma boa participação em programas PSA, uma vez que ambientes com vegetação em crescimento armazenam grandes quantidades de carbonos, aumentando assim o potencial desse SE, e podem figurar como um bom mecanismo para créditos de carbono (D'ANGIOLI et al., 2022).

Frente a isso, a valoração de SE, e em especial do estoque de carbono (por meio dos créditos de carbono), tem sido uma das principais alternativas adotadas mundialmente para mitigar os impactos das ações antrópicas aos ecossistemas naturais (NICOLLETTI; LEFÈVRE, 2016). Em um estudo pioneiro, Costanza e colaboradores (1997) estimaram que o valor dos serviços ecossistêmicos globais correspondia a 33 trilhões de dólares por ano. Em 2011, em uma nova reavaliação, o valor a ser pago pelos SE globais aumentou para 125-145 trilhões de dólares por ano (COSTANZA et al., 2011). Isso indica que, futuramente, o valor financeiro encontrado a partir das nossas estimativas para a parte aérea da vegetação lenhosa das formações savânicas da TCA poderá se tornar ainda maior caso ela seja preservada, tornando a região bastante apropriada para a implantação de projetos que visem o PSA em áreas de vegetação nativa do Cerrado.

Portanto, investigar as taxas de ganho e perda líquida de carbono em toda a TCA, promover a preservação e conservação de sua vegetação nativa e melhorar o sequestro de carbono das formações savânicas na transição é fundamental para a continuidade e ampliação do potencial desse SE na região, neutralizando assim emissões excessivas de GEE (SHA et al., 2022). A implantação de programas PSA também contribuirá para o manejo e uso sustentável dos ecossistemas na região, e a combinação dessas medidas voltadas para a conservação são cruciais para a manutenção da vida, inclusive dos humanos.

Em relação ao uso de dados orbitais para mapear e estimar espacialmente a biomassa e o estoque de carbono da vegetação lenhosa da transição Cerrado-Amazônia, verificamos que a base de dados utilizada não apresentou viabilidade para essa função, apesar de ter sido proposto por Englund et al. (2017) como um mapa oficial para toda a vegetação natural brasileira. De certo modo, esse resultado já era esperado, uma vez que a estruturação e calibração do mapa O16 foi feita com base em dados de vegetação florestal, não correspondendo de forma segura e precisa para estimativas das formações savânica em escala mais local, especialmente as que ocorrem na transição. Todavia, também não encontramos na literatura outros estudos que tenham utilizado o O16 para gerar estimativas do estoque de carbono, tanto em áreas de formações savânicas quanto florestais.

5. Conclusão

Diante de nossos resultados, acreditamos que este estudo poderá auxiliar amplamente no desenvolvimento e elaboração de políticas públicas e em tomadas de decisões que visem a conservação das formações savânicas da TCA, uma vez que fornece

um panorama preciso da abrangência territorial dessa vegetação natural ao longo de toda a transição, ocupando uma área superior a 27 milhões de hectares, e de seu alto valor financeiro pelo estoque de carbono armazenado, que corresponde a mais de R$ 62 bilhões. Frente a inviabilidade do mapa oficial de carbono do Brasil, o O16, para estimar o estoque de carbono acima do solo de vegetações tipicamente savânicas, nosso estudo ressalta também a urgente necessidade de maiores investimentos em tecnologias orbitais para o desenvolvimento de bases de dados espaciais seguras para essa finalidade não apenas para a vegetação do cerrado típico, mas para todo o Bioma Cerrado. Também, é igualmente evidente a importância de investimentos em políticas ambientais efetivas que assegurem a preservação dos ecossistemas naturais remanescentes da transição e a continuidade de seus serviços ecossistêmicos, especialmente nos limites do Bioma Cerrado, cujas leis ambientais tendem a ser mais flexíveis com a abertura de novas áreas e remoção da vegetação em áreas de vegetação não florestais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAD, J. C. S. **Abordagens em múltiplas escalas sobre serviços ecossistêmicos no sul da Amazônia legal brasileira, região de transição Amazônia/Cerrado**. 2019. 101 f. Tese (Doutorado em Ecologia e Conservação) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Nova Xavantina, 2019.

ADUAN, R. A.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do Cerrado brasileiro**. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento, documentos 105, ISS 1517-5111. EMBRAPA, 2003.

BACCINI A.; GOETZ, S.; WALKER, W. et al. Estimated carbondioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Climate Change**, v. 2, p. 182-5, 2012. Doi: https://doi.org/10.1038/nclimate1354

BARR, L. M.; PRESSEY, R. L.; FULLER, R. A. et al. A New Way to Measure the World's Protected Area Coverage. **PLoS ONE**, v. 6, n. 9, e24707, 2011. Doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024707

BHATTA, L. D.; OORT, B. E. H. V.; RUCEVSKA, L; BARAL, H. Payment for ecosystem services: possible instrument for managing ecosystem services in Nepal. **International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management**, v. 10, n. 4, p. 289-299, 2014. Doi: https://doi.org/10.1080/21513732.2014.973908

BROUWER, R.; PINTO, R.; DUGSTAD, A. et al. The economic value of the Brazilian Amazon rainforest ecosystem services: A meta-analysis of the Brazilian literature. **PLoS ONE**, v. 17, n. 5, 2022. Doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268425

BUSTAMANTE, M. M. C.; NARDOTO, G. B.; PINTO, A. S. et al. Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3, p. 655-671, 2012. Doi: https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400005

CASTRO, E. A.; KAUFFMANN, J. B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root biomass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**, v. 14, p. 263-283, 1998. Doi: https://doi.org/10.1017/S0266467498000212

COSTANZA, R. GROOT, R.; SUTTON, P. et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, p.152-158, 2014. Doi: doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; GROOT, R. et al. The value of ecosystem services: putting the issues in perspective. **Ecological Economics**, v. 25, p. 67-72, 1998. Doi: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800998000196

D'ANGIOLI, A. M.; GILES, A. L.; COSTA, P. B. et al. Abandoned pastures and restored savannas have distinct patterns of plant-soil feedback and nutrient cycling compared with native Brazilian savannas. **Journal of Applied Ecology**, v. 59, n. 7, p. 1-11, 2022. Doi: 10.1111/1365-2664.14193

DE PAULA, V. R.; SERBETO, L. SILVEIRA, F. J. et al. Identificação de áreas para disposição de biossólidos com potencial para recuperação de áreas degradadas: estudo de caso de Juiz de Fora-MG. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 15, n. 36, 2022. ISSN 1984-3240.

ENGLUND, O.; SPAROVEK, G.; BERNDES, G. et al. A new high-resolution nationwide aboveground carbon map for Brazil. **Geography and Environment**, v. 4, n 2, e00045, 2017. Doi: 10.1002/geo2.45

ESQUIVEL-MUELBERT, A.; PHILLIPS, O. L. BRIENEN, R. J. W. et al. Tree mode of death and mortality risk factors across Amazon forests. **Nature Communications**, v. 5515, p. 1-11, 2020. Doi: doi.org/10.1038/s41467-020-18996-3

FEARNSIDE, P. M. Valoração do estoque de serviços ambientais como estratégia de desenvolvimento no Estado do Amazonas. **Inclusão Soc**ial, v. 12 n. 1, p.141-151, 2018. ISSN Eletrônico: 1808-8678

FELFILI, J. M. et al. Diversity, floristics and structural patterns of cerrado vegetation in central Brazil. **Plant Ecology**, v. 175, p. 37-46, 2004.

GATTI, L. V.; BASSO, L. S.; MILLER, J. B. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, p. 1-20, 2021. Doi: https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6

HUBAU, W.; LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L. et al. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. **Nature**, v. 579, n. 7797, p. 80-87, 2020. Doi: 10.1038/s41586-020-2035-0

LAHSEN, M.; BUSTAMANTE, M. C.; DALLA-NORA, E. L. Undervaluing and Overexploiting the Brazilian Cerrado at Our Peril. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 58, n. 4, p. 1-12, 2016. Doi: 10.1080/00139157.2016.1229537

LOPES, R. B.; MIOLA, D. T. B. Sequestro de carbono em diferentes fitofisionomias do Cerrado. **SynThesis Revista Digital FAPAM**, v.2, n.2, p. 127-143, 2010.

MARACAHIPES-SANTOS, L.; SANTOS, J. O.; REIS, S. M.; LENZA, E. Temporal changes in species composition, diversity, and woody vegetation structure of savannas in the Cerrado-Amazon transition zone. **Acta Botanica Brasilica**, v. 32, n. 2, p. 1-10, 2018. Doi: https://doi.org/10.1590/0102-33062017abb0316

MARENGO, A. J.; JIMENEZ, J. C.; ESPINOZA, J. C.; CUNHA, A. P.; ARAGÃO, L. O. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia-Cerrado transition zone. **Scientifc Reports**, 12, 457, p. 1-10, 2022. Doi: https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4

MARIMON, B. S.; LIMA, E. DE S.; DUARTE, T. G. et al. Observations on the vegetation of northeastern Mato Grosso, Brazil. IV. An analysis of the Cerrado-Amazonian Forest ecotone. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 63, n. 2-3, p. 323-341, 2006. Doi: https://doi.org/10.1017/S0960428606000576

MARIMON, B. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H. FELDPAUSCH, T. R. et al. Disequilibrium and hyperdynamic tree turnover at the forest–cerrado transition zone in

southern Amazonia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 7, p. 281-292, 2014. Doi: https://doi.org/10.1080/17550874.2013.818072

MARQUES, E. Q.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MARIMON, B. S. et al. Redefning the Cerrado-Amazonia transition: implications for conservation. **Biodiversity and Conservation**, p. 1-17, 2019. Doi: https://doi.org/10.1007/s10531-019-01720-z

MASSETTI, A.; GIL, A. Mapping and assessing land cover/land use and aboveground carbon stocks rapid changes in small oceanic islands' terrestrial ecosystems: A case study of Madeira Island, Portugal (2009–2011). **Remote Sensing of Environment**, v. 239, n. 111625, p. 1-11, 2020. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111625

MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; PEDLOWSKI, M. A.; et al. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 5, p. 1117-1129, 2010. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.01.001

MEWS, H. A. MARIMON, B. S.; RATTER, J. A. Observations on the vegetation of Mato Grosso, Brazil. V. changes in the woody species diversity of a forest in the Cerrado-Amazonian Forest Transition zone and notes on the forests of the region. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 69, p. 239-253, 2012. Doi: https://doi.org/10.1017/S0960428612000145

MITCHARD, E. T. A. The tropical forest carbon cycle and climate change. **Nature**, v. 559, 2018. Doi: https://doi.org/10.1038/s41586-018-0300-2

MORANDI, P. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; OLIVEIRA, E. A.; et al. Vegetation sucession in the Cerrado-Amazonian forest transition zone of Mato Grosso State, Brazil. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 73, p. 83-93, 2016. Doi: https://doi.org/10.1017/S096042861500027X

MORANDI, P. S.; MARIMON, B. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H. et al. Tree diversity and above-ground biomass in the South America Cerrado biome and their conservation implications. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, p. 1519-1536, 2020. Doi: https://doi.org/10.1007/s10531-018-1589-8

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000. Doi: https://doi.org/10.1038/35002501

NICOLLETTI, M. X.; LEFÈVRE, G B. Precificação de carbono no Brasil: perspectivas e aprendizados a partir de uma simulação de mercado cap-and-trade. **Cadernos Adenauer xvii**, v. 2, n. 146, 2016.

NOGUEIRA, E. M.; FEARNSIDE, P. M.; NELSON, B. W.; FRANÇA, M. B. Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 248, n.3, p. 119-135, 2007. Doi: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.047

NOGUEIRA, E. M.; YANAI, A. M.; FONSECA, F. O. R.; FEARNSIDE, P.M. Carbon stock loss from deforestation through 2013 in Brazilian Amazonia. **Global Change Biology**, v. 21, p. 1271-92, 2015. Doi: 10.1111/gcb.12798

NOGUEIRA, S. H. M. **Desmatamento no bioma Cerrado:** contexto, padrões e tendências, impactos e alternativas. 2022. 141 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.

OLIVEIRA, R. S.; BEZERRA, L. E. A.; DAVIDSON, F. et al. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil. **Functional Ecology**, v. 19, p. 574-581, 2005. Doi: 10.1111/j.1365-2435.2005.01003.x

OLIVEIRA, C. P.; FRANCELINO, M. R.; DE PAULA, M. D. et al. Comparação de modelos estatísticos para estimativa da biomassa de árvores, e estimativa do estoque de carbono acima do solo em Cerrado. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 255-269, 2019. Doi: https://doi.org/10.5902/1980509827065

PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em cerrado sensu stricto do distrito federal. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 527-538, 2011. Doi: https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000300015

PASSOS, F. B.; MARIMON, B. S.; PHILLIPS, O. L. et al. Savanna turning into forest: concerted vegetation change at the ecotone between the Amazon and "Cerrado" biomes. **Brazilian Journal Botany**, v. 41, p. 611-619, 2018. Doi: https://doi.org/10.1007/s40415-018-0470-z

PARENTE, L.; MESQUITA, V.; MIZIARA, F. et al. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of**

Environment, v. 232, n. 111301, p. 1-11, 2019. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111301

PERIOTTO, N. A.; TUNDISI, J. G. A characterization of ecosystem services, drivers and values of two watersheds in São Paulo State, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, n. 3, p. 397-407, 2018. Doi: http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.166333

PETERS, G. P.; ANDREW, R. M.; BODEN, T. et al. The Chapter- 381 lenge to Keep Global Warming below 2 °C. **Nature Climatic Change**, v. 3, p. 4-6, 2013. Doi: 10.1038/nclimate1783.

RAO, N. S.; GHERMANDI, A.; PORTELA, R.; WANG, X. Global values of coastal ecosystem services: A spatial economic analysis of shoreline protection values. **Ecosystem Services**, v. 11, p. 95-105, 2015. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.11.011

RATTER, J. A.; RICHARDS, P. W.; ARGENT, G.; GIFFORD, D. R. Observations on the vegetation of the northeastern Mato Grosso. I. The woody vegetation types of the Xavantina-Cachimbo expedition area. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 226, p. 449-492, 1973. Doi: https://doi.org/10.1098/rstb.1973.0053

RAWITSCHER, F. The water economy of the vegetation ofthe campos cerrados in Southern Brazil. **Journal of Ecology**, v. 36, p. 237-268, 1948. Doi: https://doi.org/10.2307/2256669

REIS, S. M.; MARIMON, B. S.; MARIMON JUNIOR, B. H.; et al. Climate and fragmentation affect forest structure at the southern border of Amazonia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 11, p. 13-25, 2018. Doi: https://dx.doi.org/10.1080/17550874.2018.1455230

RESENDE, F. M.; FERNANDES, G. W.; ANDRADE, D. C.; NÉDER, H.D. Economic valuation of the ecosystem services provided by a protected area in the Brazilian Cerrado: application of the contingent valuation method. **Brazilian Journal Biology**, v. 77, n. 4, p. 762-773, 2017. Doi: https://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.21215

RIBEIRO, S. C.; FEHRMANN, L.; SOARES, C. P. B. et al. Above and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v. 262, p. 491-499, 2011. Doi: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.017

ROQUETTE, J. C. Distribuição da biomassa no cerrado e a sua importância na armazenagem do carbono. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1350-1363, 2018. Doi: https://dx.doi.org/10.5902/1980509833354

SAATCHI S. S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; MOREL, A. Bench-mark map of forest carbon stocks in tropical regions acrossthree continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, p. 899-904, 2011. Doi: https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108

SAMPAIO, S. M. V.; WORTMANN, M. L. C. Guardiões de um imenso estoque de carbono - floresta amazônica, populações tradicionais e o dispositivo da sustentabilidade. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 2, p. 71-90, 2014. Doi: https://doi.org/10.1590/S1414-753X2014000200006

SANTOS, J. E.; NOGUEIRA, F.; PIRES, J.S.R.; OBARA, A. T. et al. The value of the ecological station of Jataí's ecosystem services and natural capital. **Revista Brasil Biologia**, v. 61, n. 2, p. 171-190, 2001. Doi: https://doi.org/10.1590/S0034-71082001000200002

SARKODIE, S. A.; YAKUBU, M.; OWUSU, P. A. Global adaptation readiness and income mitigate sectoral climate change vulnerabilities. **Humanities and Social Sciences Communications**, v. 9, p. 113, 2022. Doi: https://doi.org/10.1057/s41599-022-01130-7

SCHOMERS, S.; MATZDORF, B. Payments for ecosystem services: A review and comparison of developing and industrialized countries. **Ecosystem Services**, v. 6, p. 16-30, 2013. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.01.002

SHA, Z.; BAI, Y.; LI, R. et al. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management. **Communications Earth & Environment**, v. 3, n. 8, p. 1-10, 2022. Doi: https://doi.org/10.1038/s43247-021-00333-1

SILVA-JUNIOR, C. A.; TEODORO, P. E.; DELGADO, R. C. et al. Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 16246, p. 1-14, 2020. Doi: https://doi.org/10.1038/s41598-020-72571-w

SILVA-JUNIOR, C. A.; ALVARADO, S. T.; CELENTANO, D. et al. Northeast Brazil's imperiled Cerrado. **Science**, v. 372, n. 6538, p. 139-140, 2021. Doi: https://doi.org/10.1126/science.abg0556

SOARES, L. C. Limites meridionais e orientais da área de ocorrência da Floresta Amazônica em território Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia**, v.1, p. 3-122, 1953.

STRAND, J.; SOARES-FILHO, B.; COSTA, M; H. et al. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest's Ecosystem Services. **Nature Sustainability**, v. 1, p. 657-664, 2018. Doi: https://doi.org/10.1038/s41893-018-0175-0

STRASSBUGR, B. N.; LATAWIEC, A. L.; BARIONI, L. G. et al. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84-97, 2014. Doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001

STRASSBURG, B. N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R. et al. Moment of truth for the cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 0099, p. 1-3, 2017. Doi: https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099

SULLIVAN, M. J. P.; TALBOT, J.; LEWIS, S. et al. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. **Scientific Reports**, v. 7, 39102, p. 1-12, 2017. https://doi.org/10.1038/srep39102

TERRA, M. C. N. S.; NUNES, M. H.; SOUZA, C. R. et al. The inverted forest: Aboveground and notably large belowground carbon stocks and their drivers in Brazilian savanas. **Science of The Total Environment**, v. 867, p. 1-13, 2023. Doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161320

VIGLIZZO, E. F.; PARUELO, J. M.; LATERRA, P.; JOBBÁGY, E. G. Ecosystem service evaluation to support land-use policy. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 154, p. 78-84, 2012. Doi: https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.007

WANG, Y.; ZIV, G.; ADAMI, M.; et al. Mapping tropical disturbed forests using multi-decadal 30 m optical satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 221, p. 474-488, 2019. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.028

WERNECK, F. P.; NOGUEIRA, C.; COLLI, G. R. et al. Climatic stability in the Brazilian Cerrado: implications for biogeographical connections of South American savannas, species richness and conservation in a biodiversity hotspot. **Journal of Biogeography**, v. 39, n. 9, p. 1695-1706, 2012. Doi: https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2012.02715.x

ZENG, S.; LIU, Z.; KAUFFMAN, G. et al. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes. **Nature Communications**, v. 10, n. 5749, p. 1-10, 2019. Doi: https://doi.org/10.1038/s41467-019-13772-4.