

revista



ISSN 2179-0892

Volume 28 • n° 3 (2024)

e230696

Explorando a dinâmica espaço-temporal das paisagens no Brasil (2002-2020): uma perspectiva para conservação

Ricardo Sartorello¹ 

¹Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: sartorello@unifesp.br

Edson Alves Filho² 

²Universidade de São Paulo, Programa de Pós-graduação em
Geografia Física, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: edsongeousp2002@yahoo.com.br

Christopher Small³ 

³Columbia University, Lamont-Doherty Earth Observatory, New
York, NY, USA
E-mail: csmall@columbia.edu

Como citar este artigo: SARTOELLO, R.; ALVES FILHO, E.; SMALL, C. Explorando a dinâmica espaço-temporal das paisagens no Brasil (2002-2020): uma perspectiva para conservação. *Geosp*, v. 28, n. 3, e230696. 2024. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2024.230696pt>



Explorando a dinâmica espaço-temporal das paisagens no Brasil (2002-2020): uma perspectiva para conservação

RESUMO

O objetivo do estudo foi identificar, quantificar e delinear unidades de paisagem no Brasil com base na dinâmica de manutenção e transformação da cobertura vegetal em escalas temporais subanuais a decênios. Foram analisadas imagens de satélite bimestrais (2002-2020) para caracterizar e quantificar a fenologia espaço-temporal da vegetação no Brasil e territórios vizinhos. A análise identificou dois principais tipos de paisagem: uma com estabilidade temporal, refletindo processos naturais antigos em biomas como Amazônia e Pantanal, e outra com variabilidade temporal, caracterizada por ciclos anuais e semestrais em áreas agrícolas e pastoris nos biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica. As variações fenológicas são influenciadas por precipitação sazonal e temperatura, além da fragmentação decorrente de atividades como agricultura e desmatamento. O mapeamento revela descontinuidades espaciais que variam dos territórios protegidos à agricultura intensiva e destaca a necessidade de fortalecer estratégias de conservação em áreas protegidas, especialmente no Pantanal, Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica.

Palavras-chave: Paisagens no Brasil. Dinâmica espaço-temporal. Fenologia da vegetação. Conservação. Agricultura.

Exploring spatiotemporal landscape dynamics in Brazil (2002-2020): a conservation perspective

ABSTRACT

This study aims to identify, quantify and delineate landscape units in Brazil based on the dynamics of vegetation cover maintenance and transformation on subannual to decadal time scales. Bimonthly satellite images (2002-2020) were analyzed to characterize and quantify the spatiotemporal phenology of vegetation across Brazil and neighboring territories. The analysis identified two main landscape types: one with temporal stability, reflecting ancient natural processes in biomes such as the Amazon and Pantanal, and another with temporal variability, characterized by annual and biennial cycles in agricultural and pastoral areas in the Caatinga, Cerrado, and Atlantic Forest biomes. Phenological variations are influenced by seasonal precipitation and temperature, as well as fragmentation resulting from human activities such as agriculture and deforestation. The mapping reveals spatial discontinuities that range from protected territories to intensive agriculture, emphasizing the need to strengthen conservation strategies in protected areas, particularly in the Pantanal, Caatinga, Cerrado, and Atlantic Forest.

Keywords: Landscapes in Brazil. Spatiotemporal dynamics. Vegetation phenology. Conservation. Agriculture.

Explorando la dinámica espacio-temporal de los paisajes en Brasil (2002-2020): una perspectiva para la conservación

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo identificar y cuantificar unidades de paisaje en Brasil, enfocándose en la dinámica de mantenimiento y transformación de la cobertura vegetal en escalas temporales de subanuales

a decenales. Se analizaron imágenes satelitales bimestrales entre 2002 y 2020 para caracterizar la fenología espacio-temporal de la vegetación en Brasil y sus territorios vecinos. El análisis reveló dos tipos principales de paisaje: uno estable, que refleja procesos naturales en biomas como la Amazonía, y otro variable, caracterizado por ciclos anuales y semestrales en áreas agrícolas y pastoriles. Además, las variaciones fenológicas están influidas por la precipitación estacional, la temperatura y la fragmentación causada por actividades humanas, como la agricultura y la deforestación, lo que subraya la necesidad de fortalecer estrategias de conservación en biomas como el Pantanal, Caatinga y Mata Atlántica.

Palabras clave: Paisajes en Brasil. Dinámica espacio-temporal. Fenología de la vegetación. Conservación. Agricultura.

INTRODUÇÃO

A paisagem geográfica, conforme Ab'Saber (2003), é uma herança resultante de longos e complexos processos de elaboração fisiográfica e ecológica. O autor destaca que, além de espaços territoriais, as paisagens e ecologias herdadas impõem responsabilidades aos povos contemporâneos.

As transformações na paisagem geradas pelas sociedades humanas resultam em efeitos nos ecossistemas e sobre a biodiversidade, como a fragmentação de habitats, a extinção de espécies, a perda de serviços ecossistêmicos e manifestações culturais (Fahrig, 2003). A substituição e a fragmentação de áreas de florestas tropicais por cobertura de áreas agrícolas e urbanas alteram de forma radical a estrutura e a funcionalidade dos ecossistemas, causando a perda da conectividade da paisagem (Foley et al., 2005; Silva et al., 2015).

De acordo com o Global Forest Watch (2024), ao comparar os anos de 2022 e 2021, os trópicos experimentaram uma perda 10% maior de florestas primárias do que a observada para o período de 2021-2020. No Brasil, o aumento superou a média dos países tropicais, atingindo aproximadamente 15%. Cerca de 40% das perdas globais de florestas tropicais primárias em 2002 ocorreram no Brasil, totalizando aproximadamente 1,8 milhão de hectares de floresta perdidos e 1,2 gigatoneladas de carbono liberadas na atmosfera. Esse número corresponde a duas vezes e meia as emissões anuais de combustíveis fósseis no país para o mesmo ano.

As florestas tropicais adaptaram-se ao atual período interglacial, expandindo-se ao longo dos últimos 12.500 anos devido ao aumento dos níveis de umidade, o que as tornou excepcionalmente resilientes. No entanto, as mudanças climáticas atuais estão ocorrendo em um ritmo muito superior ao experimentado ao longo da história recente do planeta (Hawkins et al., 2023).

A paisagem é a categoria analítica geográfica que melhor se adequa ao estudo da vegetação e da estabilidade ambiental. Pode ser definida como uma entidade espacial heterogênea que abrange tanto aspectos geomorfológicos quanto de cobertura do solo, incluindo fatores naturais e culturais (Delpoux, 1974). A cobertura vegetal, resultante da combinação dinâmica de elementos ambientais como clima, solo, geologia e hidrologia, serve como o suporte fundamental para os ecossistemas, desempenhando um papel dinâmico entre os vários compartimentos biofísicos (Bertrand, 1972).

A identificação de padrões de paisagem por meio da análise espaço-temporal da vegetação pode auxiliar no monitoramento de áreas mais suscetíveis ao desmatamento, aprimorar o design de unidades de conservação e melhorar o planejamento territorial e

ambiental de forma geral. A disponibilidade de imagens de satélite sinóticas de múltiplas décadas permite quantificar tanto as mudanças sazonais quanto as interanuais na cobertura vegetal em escalas regionais a continentais, utilizando, assim, a fenologia da vegetação para o mapeamento e monitoramento da fragmentação da paisagem e da funcionalidade dos ecossistemas. O objetivo deste estudo é identificar e quantificar padrões de paisagem em múltiplas escalas no Brasil, com base na dinâmica espaço-temporal da cobertura vegetal, considerando o período de 2002 a 2020. A análise se concentra nas características da fenologia de paisagens naturais e modificadas, destacando o papel das áreas protegidas e da agricultura dentro do território brasileiro.

A importância da vegetação na paisagem geográfica

Humboldt, no início do século XIX, introduz o termo paisagem no sentido de “característica total de uma região terrestre”, considerando a vegetação o dado mais significativo. Em 1939, Carl Troll desenvolve o conceito de Ecologia da Paisagem no contexto da geografia alemã, marcada pela fitogeografia (Rougerie; Beroutchachvili, 1991). Para Bertrand (1972) a vegetação seria a melhor síntese do meio biofísico porque fornece suporte aos demais geossistemas.

Tricart (1977) propôs uma classificação das paisagens em três tipos de unidades ecodinâmicas, com base em uma abordagem sistêmica e ecológica. As *unidades estáveis* apresentam uma pedogênese mais ativa que a morfogênese, resultando em vegetação plenamente desenvolvida. As *unidades intergrades* mostram um desenvolvimento equilibrado de morfogênese e pedogênese, típicas de áreas de transição biogeográfica, onde a fitoestasia é predominante. Por último, as *unidades instáveis* são caracterizadas por um predomínio da morfogênese sobre a pedogênese.

A variabilidade pode ser causada também por variação climática ou ação humana. Nessa visão a vegetação pode ser considerada como síntese e elemento estabilizador das paisagens e dos sistemas naturais, sendo a ação humana sobre este compartimento da paisagem o motor do desencadeamento de processos desestabilizadores que fazem com que a erosão predomine em relação à formação de solos. A metodologia de classificação de paisagens proposta por Tricart pode ser transposta ao estudo da dinâmica espaço-temporal da vegetação. Nessa abordagem, paisagens com cobertura vegetal íntegra ou em expansão são classificadas como estáveis, enquanto áreas com supressão da vegetação são consideradas instáveis. Além disso, paisagens em que as diferentes categorias de uso da terra permanecem constantes ao longo do tempo são caracterizadas como homogêneas.

Evolução biogeográfica das Florestas Tropicais brasileiras

As florestas tropicais atuais se caracterizam por ocuparem áreas com clima quente e úmido e por estarem distribuídas ao longo da linha do Equador, entre os trópicos de Câncer e Capricórnio. A umidade dessas florestas é controlada diretamente pelos movimentos sazonais da Zona de Convergência Intertropical (ZCI), resultado do encontro dos ventos oriundos dos hemisférios norte e sul, os quais garantem alta pluviosidade local (MacGregor; Nieuwolt, 1998).

A Mata Atlântica tem sua origem há 150 milhões de anos, entre os períodos Jurássico e Cretáceo (Salgado-Labouriau, 1994), em período em que América do Sul e África começaram

a se separar. Houve o surgimento de bacias sedimentares, como a do Paraná, e de novas bacias hidrográficas que resultaram no estabelecimento de um ambiente florestal já no início do Paleógeno (Andrade-Lima; Bigarella, 1982). Durante o Quaternário, a Mata Atlântica passou por intensas mudanças geográficas devido a processos climáticos globais, como variações nos padrões de temperatura e precipitação (Martin et al., 1980). Essas mudanças ocorreram de forma desigual entre as porções norte e sul do bioma, exigindo unidades biogeográficas distintas, com diferentes histórias geológicas e evolutivas (Behling, 1997; Ledru et al., 2005; Carnaval; Moritz, 2008).

No Cretáceo Inferior, a Floresta Amazônica abrangia uma região mais ampla, estendendo-se até o atual sul do Brasil (região Pan-Amazônica). A região começou a mudar lentamente há cerca de 100 milhões de anos, com eventos tectônicos durante a separação das placas da América do Sul e África (Hoorn et al., 2010). No Mioceno, aproximadamente 23 milhões de anos atrás, a colisão entre as placas de Nazca e da América do Sul resultou no soerguimento dos Andes. A partir do Plioceno (10 milhões de anos atrás), com os Andes atingindo sua altitude atual, ocorreu uma mudança drástica no clima da região, com intensificação das chuvas. Notou-se o processo de orogenia e sedimentação na Bacia Amazônica, a formação de um lago na Amazônia central e a subsequente mudança dos fluxos de drenagem em direção ao Oceano Atlântico (Shepard et al., 2010).

Mudanças climáticas em escala continental, resultantes dos efeitos orbitais e tectônicos da Terra sobre a dinâmica dos oceanos e da atmosfera, continuam a impulsionar ciclos de expansão e contração em áreas florestais desde o Eoceno e ao longo do Quaternário (Flenley, 1998; Morley, 2000). Esse processo também ocorreu durante os últimos dois milhões de anos, ao longo do período Quaternário (Haffer, 1969; Mayle et al., 2004).

Áreas de conservação no Brasil

Desde os tempos coloniais, o Brasil desenvolveu um sistema regulatório para a criação de unidades de conservação. A Carta Real de 1797 estabeleceu que as florestas e bosques localizados em encostas ou nas proximidades de cursos d'água eram propriedade da coroa portuguesa (Araújo, 2011). No início do século XX, o primeiro Código Florestal, publicado em 1934, definiu categorias de proteção florestal e estabeleceu as primeiras unidades de conservação no Brasil, como a Floresta Nacional de Lorena (1934), o Parque Nacional de Itatiaia (1937) e os Parques Nacionais do Iguaçu e da Serra dos Órgãos (1939).

A Conferência de Estocolmo (1972) e os compromissos de conservação ambiental do Brasil levaram à criação de uma Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA) dentro do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), responsável por desenvolver o Plano do Sistema de Unidades de Conservação (1979-1982). Esse plano visava identificar lacunas para a criação de unidades de conservação e selecionar as unidades existentes mais relevantes para formar um sistema de parques nacionais. Nesse contexto, algumas unidades de conservação foram estabelecidas na Amazônia, como a Floresta Nacional do Jamari em Rondônia.

Somente na década de 2000, com a Lei Federal nº 9.985 e a criação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), é que os mecanismos e estratégias legais para a criação de unidades de conservação foram unificados. Desde então, foram criadas 151 unidades de conservação federais, adicionando 134 milhões de hectares ao sistema nacional de proteção.

A criação de unidades de conservação e outras áreas protegidas, como Terras Indígenas e territórios para populações tradicionais, impediu a emissão de 60 milhões de toneladas de CO₂ entre 1982 e 2016, com uma redução de 66% no desmatamento nessas áreas. De 1990 a 2020, foram desmatados 1,1 milhão de hectares em Terras Indígenas, enquanto 47,2 milhões de hectares foram desmatados em terras privadas (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, 2021).

Considerando a expansão da fronteira agrícola, que ameaça as florestas tropicais, e a leniência dos governos na fiscalização e prevenção do desmatamento, as áreas protegidas têm contribuído efetivamente para a preservação das áreas florestais do Brasil, resguardando uma variedade de paisagens naturais do país.

Transformações das paisagens agrícolas

A paisagem agrícola reflete a influência de elementos bióticos, abióticos e antrópicos. Nesse espaço, a base territorial é formada pela interação desses elementos com as atividades humanas, especialmente os processos econômicos (Ribas Vilas, 1992).

Ross et al. (2022) propõem um ordenamento territorial para o Brasil, definindo as unidades socioeconômicas como espaços territoriais com transformações diferenciadas e produtividade econômica, englobando as principais paisagens agrícolas do país. Os autores identificam as características das paisagens agrícolas em cada um dos seis biomas brasileiros: 1) Amazônia - expansão da pecuária de corte; 2) Pantanal - predominância da pecuária extensiva; 3) Cerrado - combinação de pecuária extensiva e agricultura intensiva de grãos e fibras; 4) Caatinga - foco na pecuária extensiva e na agricultura irrigada; 5) Mata Atlântica - um mosaico de agropecuária, agricultura intensiva em grãos, cana-de-açúcar, café e citros; e 6) Pampa - presença de pecuária extensiva, silvicultura e agricultura intensiva em grãos.

Em 2023, a soja, atualmente a principal cultura agrícola do Brasil, alcançou uma produção de 152,1 milhões de toneladas, gerando uma receita de 348,7 bilhões de reais. A cana-de-açúcar apresentou uma produção de 782,6 milhões de toneladas, com receita de 102 bilhões de reais. O milho, por sua vez, resultou em 132 milhões de toneladas colhidas e gerou 101,8 bilhões de reais em rendimentos. A produção de café totalizou 3,4 milhões de toneladas, com receita de 44 bilhões de reais. Por fim, a produção de algodão somou 7,5 milhões de toneladas, resultando em 29,7 bilhões de reais (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023).

MÉTODOS

Foram utilizadas imagens de satélite sinóticas para mapear a cobertura vegetal no território brasileiro em escalas temporais que variam de sazonais a decadais, utilizando composições bimestrais do índice de vegetação no período de 2002 a 2020. Foram quantificadas as características espaço-temporais da dinâmica da vegetação por meio da análise de Funções Ortogonais Empíricas, visando identificar as fenologias mais distintas de endmembers. Em seguida, essas fenologias foram mapeadas como gradientes contínuos utilizando um modelo de mistura temporal linear, conforme detalhado na seção seguinte.

Dados

As composições do Índice de Vegetação Aprimorado (Enhanced Vegetation Index - EVI) do MODIS foram obtidas gratuitamente na Biblioteca de Dados do Instituto Internacional de Pesquisa para o Clima e a Sociedade (IRIDL). Foi utilizada a camada EVI do Produto MOD13Q1, Versão 6 (Índices de Vegetação MODIS/Terra 16 Dias L3 Global 250m, Grade Sinusoidal) (Instituto Internacional de Pesquisa para o Clima e a Sociedade, 2024). O algoritmo MOD13Q1, descrito por Huete, Justice e van Leeuwen (1999), forma imagens compostas a partir do valor máximo do EVI de uma única data para cada pixel de 250 m, considerando todas as observações filtradas por qualidade dentro de uma janela rolante de 16 dias. O EVI é uma medida normalizada da amplitude da reflectância do infravermelho próximo, que é sensível a variações tanto na estrutura da copa quanto na dispersão volumétrica (Huete et al., 2002). Diferentemente do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN ou Normalized Difference Vegetation Index - NDVI), o EVI é mais robusto em relação aos efeitos atmosféricos e nas estimativas de abundância de vegetação em área derivadas de modelos de mistura espectral (Small, 2004; Small; Milesi, 2013; Sousa; Small, 2017, 2023).

Os dados vetoriais dos Biomas brasileiros foram adquiridos no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em nível de detalhe compatível com a escala 1:5.000.000, produzido no ano de 2006, disponibilizado para acesso gratuito em Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024).

Os dados vetoriais das Unidades de Conservação (UCs) no território brasileiro foram obtidos no portal de dados abertos do governo federal, sobre o Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC) com dados de UCs federais, estaduais e municipais, versão 2024 (Brasil, 2024a). Considerando a escala de análise e os objetivos do estudo, os polígonos das UCs de Proteção Integral e de Uso Sustentável foram unificados em uma única classificação de Unidades de Conservação.

Os dados e vetores da produção agrícola de arroz, café, cana-de-açúcar e soja no Brasil foram obtidos no site da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) (Brasil, 2024b). Os dados foram selecionados por estado, entre os anos de 2014 e 2020, conforme a disponibilidade, sendo escolhido o dado mais próximo ao ano 2020. Devido à escala de análise para o território brasileiro, foi realizada uma filtragem dos polígonos menores que 100.000 hectares.

Procedimentos

Conduziu-se uma análise espaço-temporal da série de imagens MODIS EVI, usando a metodologia descrita em detalhes por Small (2012). O método caracteriza a variância espacial e temporal usando os Componentes Principais (PC) e suas correspondentes Funções Ortogonais Empíricas (EOF), respectivamente. Baseia-se na análise clássica PC/EOF desenvolvida por Lorenz (1956) para previsão estatística do tempo, para quantificar a partição de variância e identificar a dimensionalidade determinística com base em EOFs periódicos. O desafio de atribuir significado físico a EOFs individuais derivados estatisticamente é realizado por uma segunda mudança de base na forma de um modelo de mistura temporal linear. O modelo de mistura temporal utiliza membros finais

(*endmembers*) temporais identificados pela análise EOF para representar as fenologias de vegetação mais distintas que podem descrever toda a diversidade de comunidades de vegetação presentes na área de estudo. A linearidade da mistura e identificação dos *endmembers* temporais que definem o modelo de mistura é baseada na topologia do espaço com as características temporais de PCs de ordem inferior. Quando a linearidade é confirmada e um conjunto escasso de *endmembers* temporais é identificado, o modelo de mistura linear é invertido para fornecer estimativas de frações de cada *endmember* temporal para cada série temporal no cubo espaço-temporal EVI.

Dada a breve descrição acima, a relação entre a caracterização PC/EOF e o modelo de mistura temporal pode ser abordada explicitamente. Girar o sistema de coordenadas para alinhar com dimensões ortogonais de variância não correlacionada, permite que qualquer série temporal de pixels em uma localização P_{xt} , contida em uma série temporal de imagens N , seja representada como uma combinação linear de padrões temporais (funções de base), F , e sua localização específica por componentes (pesos), C , onde (Equação 1):

$$P_{xt} = \sum_{i=1}^N C_{ix} F_{it} \quad (1)$$

C_{ix} é o componente principal espacial e F_{it} é sua função ortogonal empírica temporal correspondente, e i é a dimensão. EOFs são os autovetores da matriz de covariância, representando padrões temporais não correlacionados de variabilidade nos dados. PCs são os pesos espaciais correspondentes que representam a contribuição relativa de cada EOF temporal para a série temporal correspondente P_{xt} , em cada local x . A contribuição relativa de cada EOF para a variância espaço-temporal total é dada pelos autovalores da matriz de covariância. N é o número de dimensões temporais discretas representadas pelos dados; que pode ser maior ou menor que a dimensionalidade física real do(s) processo(s) que dá origem às observações fenológicas.

Em sistemas onde um pequeno número de processos determinísticos se manifesta amplamente e os processos estocásticos não são espacialmente correlacionados, a variância da estrutura espaço-temporal dos processos determinísticos pode ser representada por um subconjunto das dimensões PC/EOF de baixa ordem, enquanto a variância estocástica pode ser contida nas restantes dimensões de ordem superior (Preisendorfer, 1988). A distinção entre dimensões determinísticas de ordem inferior e dimensões estocásticas de ordem superior pode ser derivada da partição de variância dada pelos autovalores e características baseadas fisicamente (por exemplo, periodicidades e tendências) nos EOFs temporais. Quando uma distinção clara pode ser feita, a soma dos termos dados acima pode fornecer uma base estatística para a separação dos componentes determinísticos e estocásticos de uma distribuição espacial de séries temporais.

Quando se observam ruídos nos dados, uma suposição implícita é que algum número, D ($\leq N$), de dimensões de ordem inferior corresponde a processos determinísticos e que dimensões de ordem superior correspondem a ruído estocástico. Isso permite que uma coleção observada de séries temporais seja representada como uma soma de componentes determinísticos e estocásticos (Equação 2):

$$P_{xt} = \sum_{i=1}^D C_{ix} F_{it} + \epsilon \quad (2)$$

onde a soma ponderada das dimensões de ordem inferior de valores D , $C_{ix} F_{it}$, representa o componente determinístico e o residual, ϵ , representa o ruído estocástico.

Assim como a caracterização EOF, um modelo de mistura temporal representa um conjunto de séries temporais como uma combinação linear de padrões temporais (*endmembers* fenológicos) e ruído residual. Cada P_{xt} específico de localização em uma série temporal de imagens N pode ser representado de forma semelhante como uma combinação linear de *endmembers* temporais D' , E_{it} , e um componente residual, ϵ , definido por (Equação 3):

$$P_{xt} = \sum_{i=1}^{D'} f_{ix} E_{it} + \epsilon \quad (3)$$

onde as frações específicas do pixel f_{ix} podem representar a fração de área da observação mista, exibindo o padrão temporal do *endmember* correspondente. O modelo de mistura linear pode ser invertido para cada série temporal EVI para encontrar as frações ideais f_{ix} de cada fenologia do *endmember* temporal, minimizando o ϵ residual (Boardman, 1989). Nessa análise usamos a familiar inversão de mínimos quadrados fornecida por Settle e Drake (1933) onde $f = (E^T E)^{-1} E^T P_{xt}$ para cada série temporal de EVI, para cada pixel. O resultado é um conjunto de mapas de frações que representam a distribuição espacial de diferentes semelhanças fenológicas de *endmembers*. Dinamicamente, os *endmembers* temporais, E_{it} , representam processos fenológicos distintos e ϵ representa o ruído residual não modelado. A validade do modelo de mistura temporal pode ser quantificada usando o desajuste RMS do modelado em relação aos espectros observados para cada pixel no cubo espaço-temporal EVI.

RESULTADOS

A aplicação do modelo de mistura temporal linear revela a variação espaço-temporal da fenologia da vegetação, manifestada como dinâmicas de paisagem. A Figura 1 apresenta a distribuição espacial da densidade e da variabilidade da vegetação em todo o Brasil, com base na análise estatística temporal da média e do desvio padrão do EVI.

A composição RGB aplicada ao modelo permite a identificação de três grandes agrupamentos de paisagem: em tons de verde se encontram as paisagens homogêneas, definidas pela presença da vegetação perene, ao passo que as áreas com tons mais escuros, podem ser definidas com menor presença de vegetação e menor variabilidade temporal. Por fim, as paisagens instáveis são delimitadas pelas áreas com tons em magenta e branco, marcadas pela presença de vegetação marcadamente sazonal.

A análise EOF do cubo espaço-temporal derivado das imagens MODIS EVI produz a partição de variância mostrada na Figura 2. Para a primeira ordem, as feições espaço-temporais são 3D, com as três dimensões de ordem inferior (> 1%) representando 77% da variância total no cubo espaço-temporal EVI. As próximas quatro dimensões acima do piso de ruído representam <1% de variância total cada, mas correspondem a EOFs determinísticos (ou seja, periódicos) que representam ciclos semestrais e tendências interanuais. EOFs de dimensões

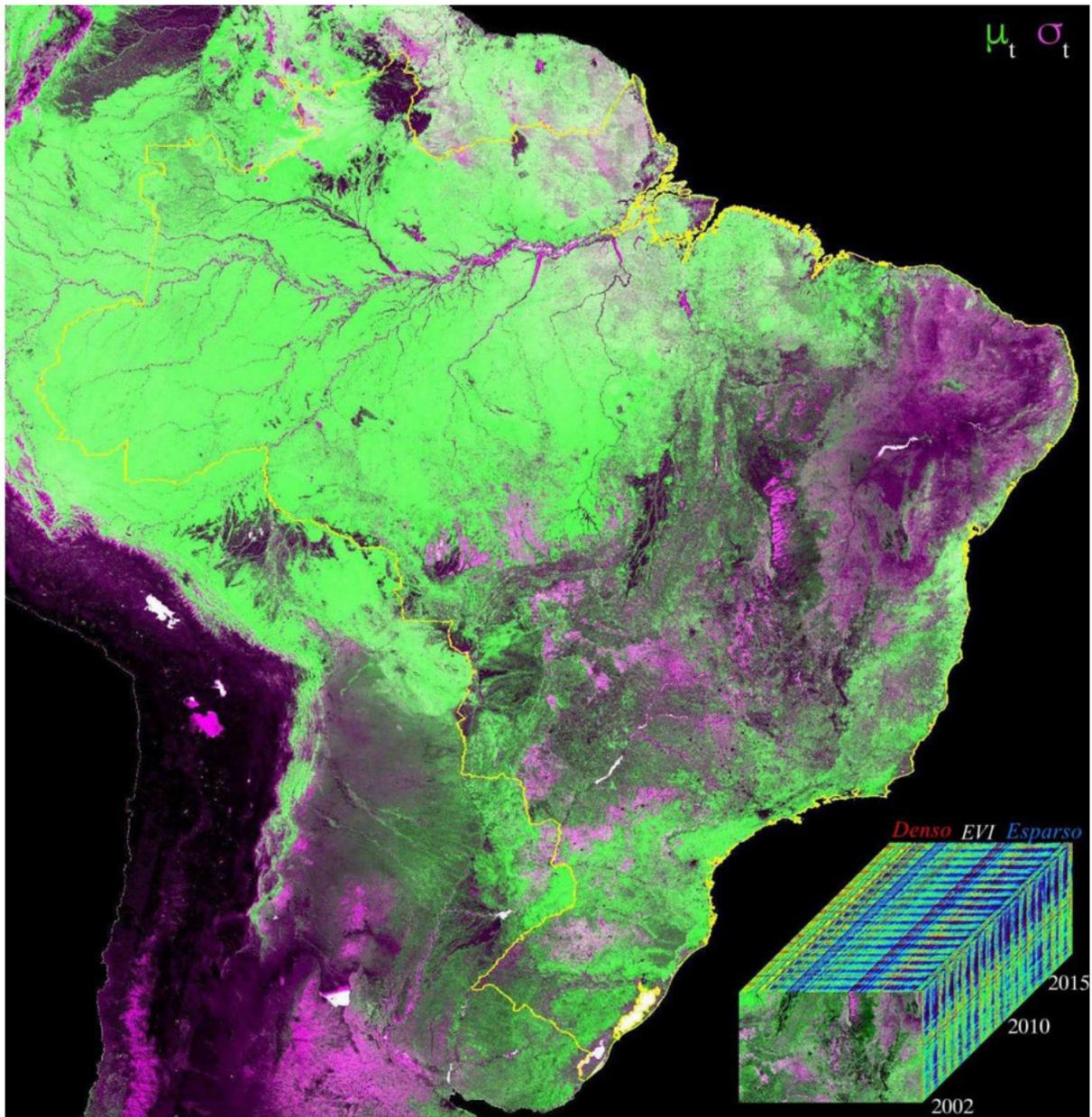


Figura 1 – Imagem-síntese da vegetação da área de estudo. Média temporal (μ_t) e desvio padrão (σ_t) do Sensor MODIS Enhanced Vegetation Index (EVI) com intervalo temporal bisemanal [2002, 2020] ilustram o *continuum* entre a fenologia da vegetação perene (verde) e sazonal (magenta). Áreas com abundância de vegetação e alta variabilidade estão mais próximas do branco, enquanto que áreas com pouca vegetação estão mais próximas do preto. Cubo EVI ilustra a variabilidade espacial da fase e amplitude fenológicas em escala quilométrica entre agricultura e vegetação natural. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

mais altas (> 7) carecem de periodicidades claras e cada vez mais se assemelham aos ruídos dos valores encontrados.

As feições espaço-temporais abrangidas pelos três EOFs de ordem inferior são dadas pelo espaço dos três PCs de ordem inferior. Na Figura 3, apresentam-se as projeções ortogonais do espaço 3D dos PCs considerados.

As feições espaço-temporais da Figura 3 revelam pelo menos quatro vértices distintos correspondentes aos *endmembers* temporais que delimitam esse espaço virtual. Esses

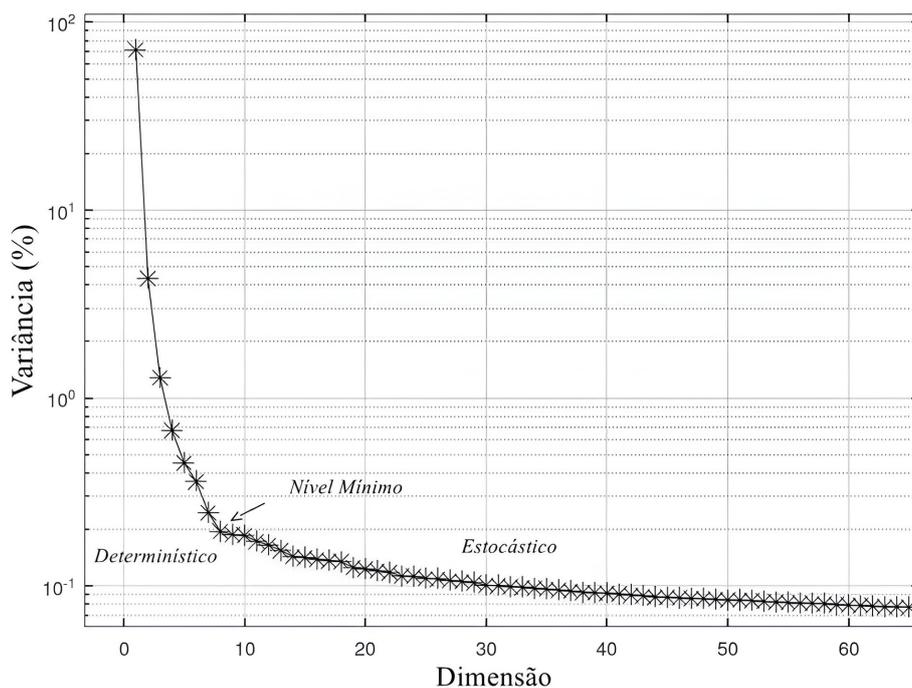


Figura 2 – Partição de variância do Sensor EVI MODIS para as feições espaço-temporais. Para a primeira ordem, a feição espacial é efetivamente 3D (> 1%), representando 77% da variância total. No entanto, existem quatro dimensões determinísticas adicionais acima do continuum abaixo do limite de ruído. Cada uma dessas dimensões estocásticas representa menos de 1% da variância total, mas seus EOFs temporais são fisicamente distintos, correspondendo a fenologias de ciclo duplo (semenstrais) (4,5) e tendências decadais (6,7).

Fonte: Elaborado pelos autores.

endmembers temporais representam três fenologias distintas, bem como um quarto *endmember* não-vegetado com variância mínima. As fenologias dos *endmembers* correspondem a vegetação perene, com um ciclo anual e um ciclo semestral.

A inversão do modelo de mistura temporal de quatro *endmembers* produz um mapa de fração fenológica para cada *endmember* temporal (Figura 4). As frações são geralmente bem limitadas [0,1] com um desajuste RMS modal de 0,10 (99%, <0,18). Isso é consistente com a partição de variância, mostrando 21% da variância total associada às dimensões de ruído estocástico. Esse resultado é típico das imagens MODIS EVI nos trópicos devido à frequência relativamente alta de contaminação de nuvens.

O mapa de frações, mostrado na Figura 4 é amplamente consistente com a climatologia e a biogeografia do Brasil, mas muito mais detalhado espacialmente do que qualquer outro mapa em escala continental que se tem conhecimento. Além de mostrar as fenologias dominantes como cores primárias (vermelho, verde, azul), o mapa mostra extensas áreas de gradiente fenológico (misturas) como cores primárias subtrativas (ciano, magenta e amarelo).

A abundância relativa de vegetação, modulada pela fração de *endmembers* sem vegetação (não exibida), manifesta-se como o brilho e a saturação das cores na imagem. Consequentemente, as áreas com vegetação menos densa aparecem escuras e as áreas totalmente sem vegetação aparecem em preto. A Figura 5 mostra esses EOFs temporais e a distribuição geográfica dos PCs espaciais correspondentes. Como os EOFs temporais 4 e 5 representam ciclos duplos (semenstrais) com mudança de fase, eles fornecem alguns detalhes adicionais sobre a fase

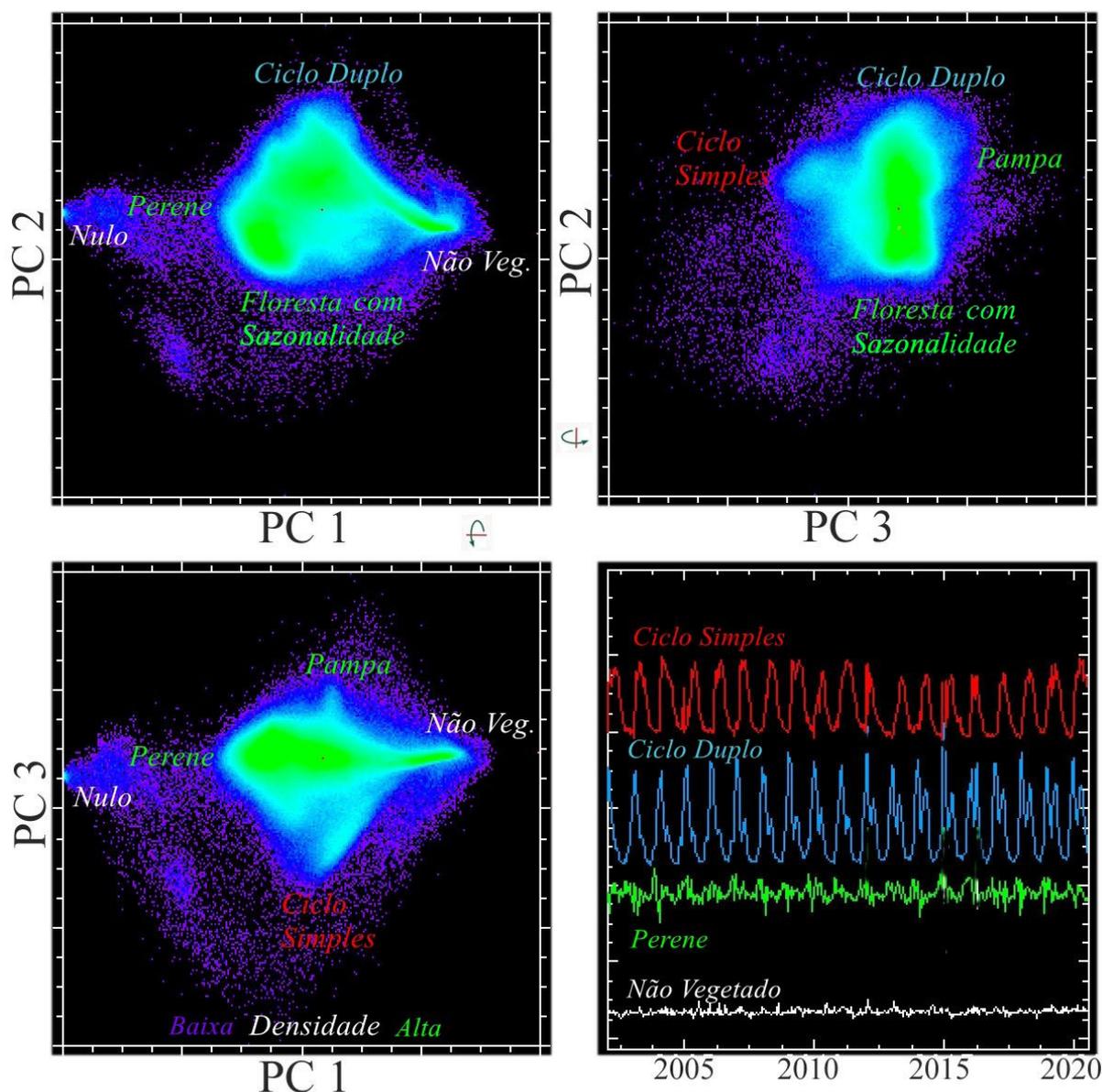


Figura 3 – Feições espaço-temporais dos componentes principais de baixa ordem, oriundos do cubo representado pelas imagens MODIS EVI. As feições espaciais 3D têm seis ápices distintos, correspondentes a diferentes fenologias. São mostrados os quatro *endmembers* temporais mais distintos. A floresta tropical com sazonalidade é semelhante à floresta perene, mas com uma ligeira sazonalidade. Corresponde a grande parte da Amazônia. O Pampa tem forte sazonalidade, bastante distinta a partir de um *endmember* de ciclo único, mas que corresponde apenas a uma pequena área no canto sudoeste do domínio espaço-temporal. As áreas com valores nulos correspondem a locais com dados em falta. Os membros finais não modelados projetam-se para o exterior do modelo ao longo de uma mistura de continuações entre os quatro *endmembers* modelados.

Fonte: Elaborado pelos autores.

sazonal do *endmember* de ciclo duplo. Embora a fração fenológica semestral corresponda à diferença entre os EOFs 4 e 5 (preto), algumas áreas distintas, correspondentes a fases diferentes (marcadas em vermelho), são aparentes. Como essas duas dimensões juntas representam apenas 1,1% da variância total, elas são mais relevantes em área, demarcando frações significativas da fenologia semestral (azul na Figura 4).

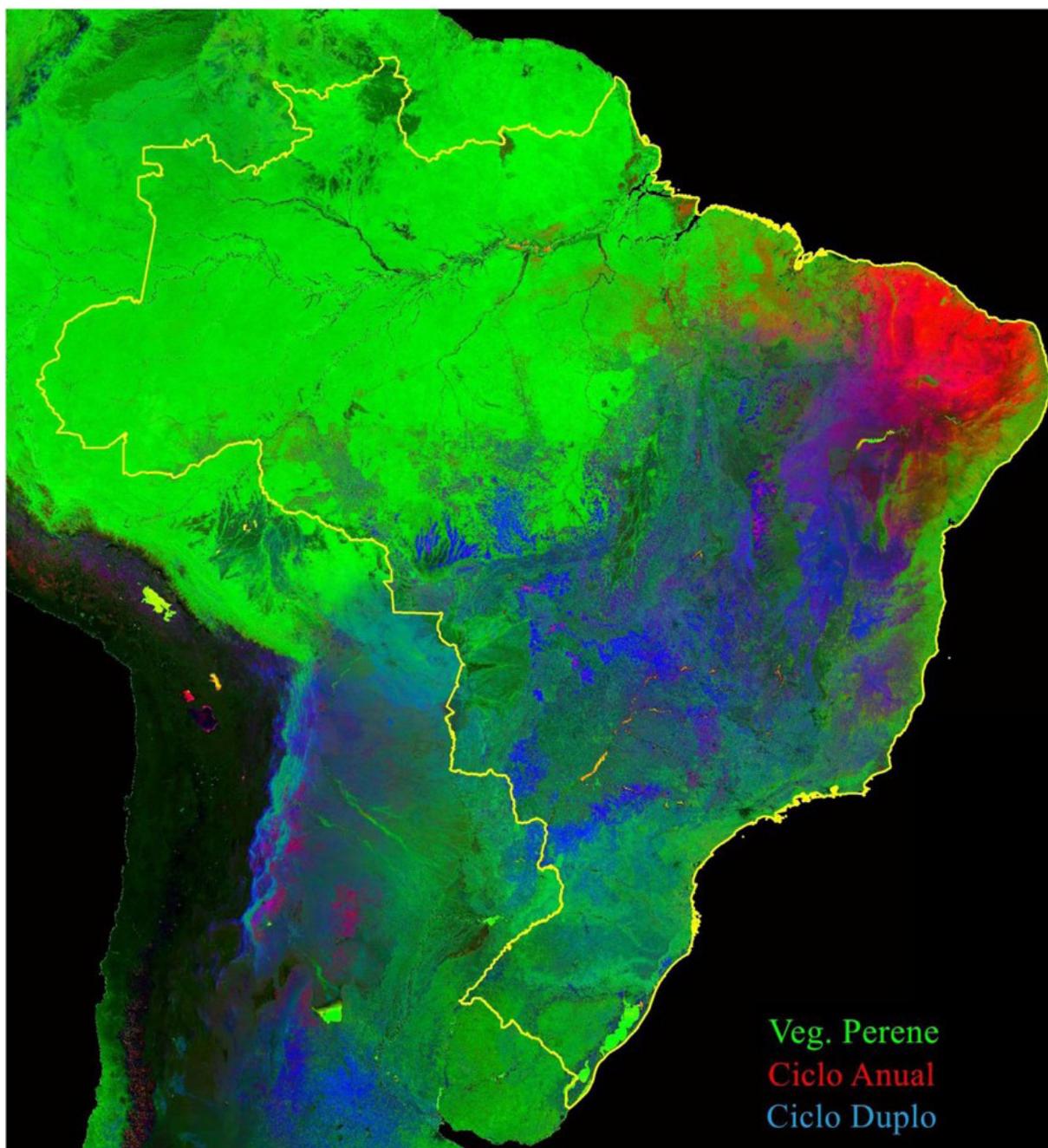


Figura 4 - Imagem da fenologia da vegetação derivada da inversão do modelo de mistura temporal dos quatro *endmembers* principais. A omissão da fração de *endmembers* não vegetados da composição RGB torna o brilho proporcional à abundância da vegetação. As cores primárias (RGB) correspondem às três fenologias vegetadas, enquanto misturas de primárias (p.e. ciano, magenta, amarelo) correspondem a fenologias intermediárias ou mistas.

Fonte: Elaborado pelos autores.

DISCUSSÃO

De maneira geral, as variações identificadas a partir da análise espaço-temporal das imagens MODIS EVI entre 2002 e 2020 representam características das principais estruturas da paisagem contemporânea brasileira. Existem claramente dois tipos predominantes de paisagens: as paisagens mais estáveis, que são remanescentes de processos naturais

antigos que persistem até os dias atuais em maior proporção dentro das áreas de vegetação conservada dos biomas Amazônia e Pantanal; e as paisagens mais instáveis, resultantes de mudanças antropogênicas mais recentes, principalmente associadas à produção agrícola e pecuária, gerando a supressão e fragmentação da vegetação natural, conforme observado no Cerrado, na Mata Atlântica, na Caatinga e no Pampa.

A análise da densidade e variabilidade da vegetação (Figura 1) identificou uma representação altamente sintética desses dois tipos de paisagens. Há uma extensa área sombreada em verde na região norte do Brasil, correspondente à Floresta Amazônica, que exibe maior densidade e menor variabilidade na vegetação. Apesar das variações climáticas interanuais na região amazônica, devido ao fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENSO) (Marengo et al., 2009), a média temporal e o desvio padrão dos dados de vegetação indicam a resiliência da floresta tropical ao longo de quase 20 anos.

Na região central da Figura 1, observa-se uma complexidade de tons mais escuros de verde, relacionados a áreas úmidas como o Pantanal (Centro-Oeste na figura) e a Bacia do Araguaia (Centro-Norte na figura). Os tons de verde acinzentado, que apresentam maior variabilidade, correspondem à formação vegetal do Cerrado. Os tons de magenta indicam áreas com menor densidade e alta variabilidade de vegetação. Podemos distinguir dois grupos de tons de magenta: o primeiro relaciona-se às características da formação vegetal, como observado na Caatinga (Nordeste na figura); o segundo refere-se a áreas destinadas ao cultivo de culturas como soja, milho, cana-de-açúcar e algodão nas regiões sul, sudeste e centro-oeste.

Segundo Kayano e Andreoli (2009), o clima na região Nordeste do Brasil apresenta variabilidade interanual significativa, especialmente em relação à precipitação, com alguns anos sendo extremamente secos e outros chuvosos. Ab'Saber (2003) enfatiza que, para o cotidiano dos habitantes do sertão e sua sobrevivência, o fator mais crítico reside nas irregularidades climáticas periódicas que afligem os espaços sociais do *hinterland* seco. Essa variabilidade climática, juntamente com outros fatores, como topografia e tipos de solo, se reflete na variação da vegetação, resultando em um delineamento distinto dos limites do Domínio da Caatinga - depressões intermontanas e interplanálticas semiáridas.

Observando a imagem da fenologia (Figura 4), é possível definir uma unidade de paisagem associada a fenologias que exibem um ritmo mais homogêneo de variação fenológica e maior estabilidade, representando as áreas florestadas perenes do Brasil. Essa unidade é predominantemente identificada no interior do bioma Amazônico, mas também está presente em partes do bioma Mata Atlântica, acompanhando a fachada costeira e os limites internos, onde a Floresta Ombrófila Mista é proeminente. Ao sul do Brasil, essa paisagem homogênea segue os contornos do bioma Pampa, onde a presença de gramíneas e arbustos, caracterizados por baixo crescimento, muda pouco ao longo do tempo, ilustrando assim a homogeneidade e estabilidade desse padrão paisagístico.

A imagem da fenologia (Figura 4) também possibilita o delineamento de unidades de paisagem instáveis (tonalidades mais próximas ao vermelho e roxo), correspondendo aos biomas Caatinga e Cerrado. Essas áreas são caracterizadas por fenologias em que a sazonalidade é o elemento determinante, seja pela presença de uma estação seca bem definida ou pelo avanço da fronteira agrícola, particularmente no Cerrado, onde culturas anuais e de ciclo duplo ocupam extensas áreas. Tons de roxo e azul indicam, por exemplo, os chapadões no oeste da Bahia, assim como as áreas de cultivo próximas à Chapada Diamantina. Na transição entre os biomas Cerrado e Amazônico, particularmente na região

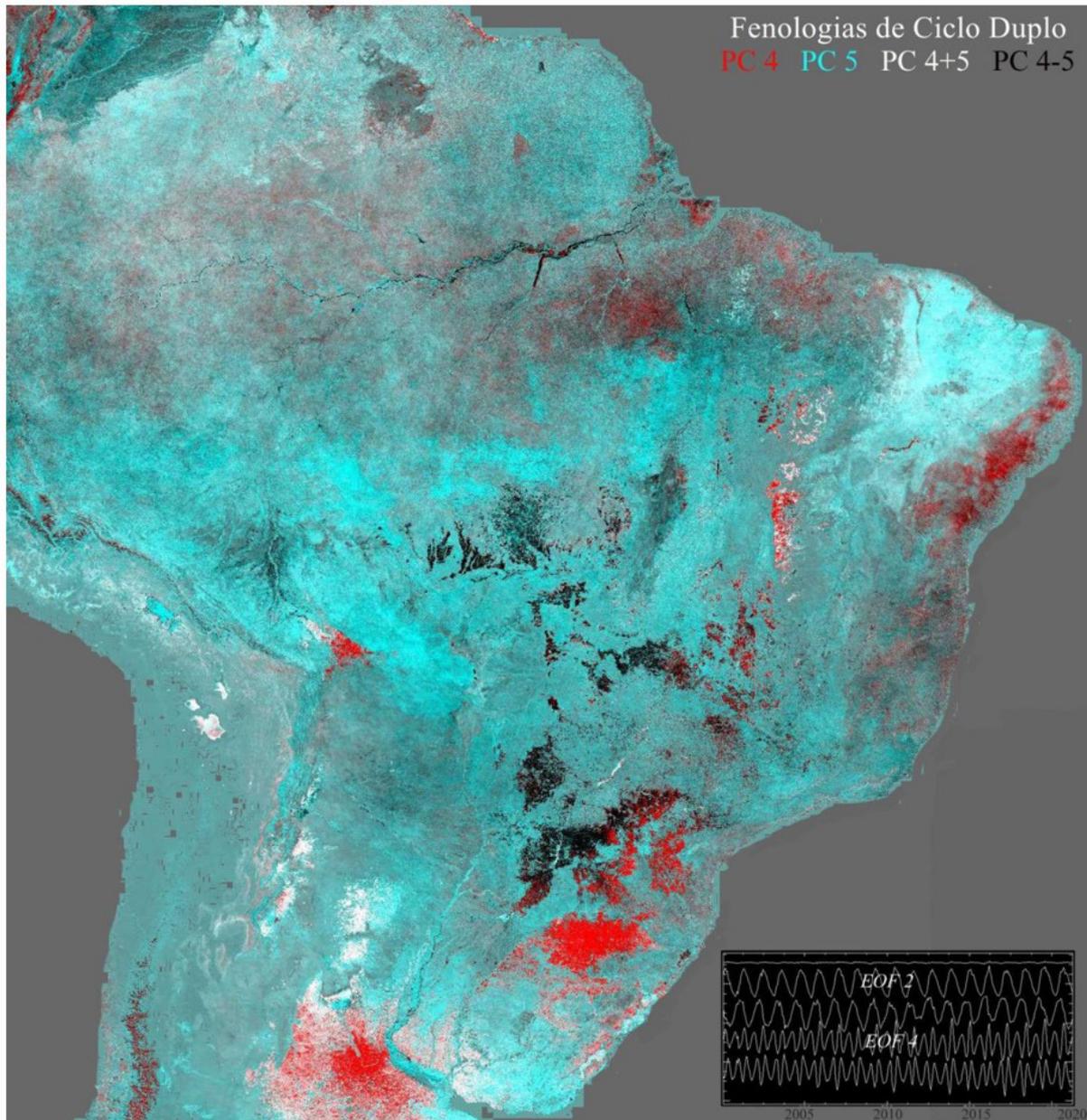


Figura 5 - Composição de análise de componentes principais (PC) das fenologias de ciclo duplo (semestral), com dimensões 4 (vermelho) e 5 (ciano). Como ambas as fenologias de ciclo duplo contribuem para o endmember agrícola de dupla safra, elas estão implicitamente representadas no modelo de 4 endmembers, mas ressaltam a variabilidade de fase dentro do endmember de dupla safra. Observe que os pares de componentes ortogonais empíricos (EOF) 2 e 3, bem como 4 e 5, estão deslocados em fase, de modo que os PCs de cada par formam um plano de fase capaz de representar deslocamentos de fase nos ciclos simples (2 e 3) e duplos (4 e 5).

Fonte: Elaborado pelos autores.

centro-norte do estado de Mato Grosso, destaca-se outra área com fenologia de crescimento duplo, correspondente à principal zona de produção agrícola do estado.

A imagem da Figura 5 destaca as variações na fenologia de ciclo duplo, representando assim áreas de agricultura perene ou regiões onde o cultivo ocorre duas vezes por ano. Essa figura enfatiza as áreas de cultivo localizadas nos planaltos pré-costeiros do Nordeste do Brasil, a fronteira agrícola do oeste da Bahia vinculada ao cultivo de soja na região de

Barreiras, as culturas de grãos no sul de Goiás e no Triângulo Mineiro, as zonas de produção de grãos de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, e finalmente, as áreas de cultivo de grãos no oeste do Paraná, em São Paulo e no norte do Rio Grande do Sul. Parte da variação pode ser explicada pelas colheitas intercaladas de soja e milho em algumas regiões, assim como pelas culturas de verão e inverno. A variabilidade representada por essa unidade de paisagem decorre do fato de que abrange áreas onde a reconversão do uso da terra é mais intensa, aparecendo intercaladas na unidade de paisagem homogênea/estável ou ao longo de suas bordas, o que, em última análise, exerce pressão sobre essa unidade de paisagem, onde o elemento florestal permanece constante ao longo do tempo.

A imagem da fenologia (Figura 4) pode ser interpretada no contexto dos biomas brasileiros, das Unidades de Conservação, das Terras Indígenas e das culturas agrícolas de soja, cana-de-açúcar, café e arroz (Figuras 6, 7 e 8). Os limites dos biomas brasileiros não correspondem aos limites das unidades de paisagem indicadas pelo estudo temporal da fenologia. Para o bioma Amazônico, a Figura 6 representa a fenologia estável ao longo do tempo, com vegetação abundante típica de áreas de vegetação perene. Tons mais escuros indicam a ausência de vegetação (água), enquanto tonalidades próximas ao marrom e roxo referem-se a culturas anuais e de ciclos duplos (semestrais), confinadas ao Arco do Desmatamento. No bioma Caatinga, a fenologia é representada em tons de vermelho, descrevendo um padrão associado a uma cobertura vegetal menos densa e com marcada sazonalidade. Tons roxos, concentrados na porção sul do bioma, indicam culturas anuais e semestrais, enquanto os tons verdes representam os ecótonos típicos da transição Caatinga-Mata Atlântica.

No bioma Cerrado, aparece uma mistura de tons verdes, roxos e vermelhos. Os tons verdes estão associados aos ecótonos Cerrado-Floresta Amazônica e Cerrado-Mata Atlântica, enquanto os tons vermelhos representam os ecótonos Cerrado-Caatinga. Finalmente, as áreas marcadas em roxo refletem culturas anuais e semestrais típicas das áreas agrícolas consolidadas e em expansão no Brasil. No bioma Pantanal, predominam tons de verde mais escuro, característicos de áreas com cobertura vegetal persistente, mas de menor densidade. No bioma Mata Atlântica, prevalecem os tons verdes, típicos da vegetação densa e, ao lado de nuances roxas, características da agricultura de ciclo anual e de ciclo duplo. Por último, no bioma Pampa, tonalidades de verde mais escuras indicam áreas de vegetação perene, embora com menor densidade.

Há uma relação espacial entre a distribuição das Unidades de Conservação (UCs) e das Terras Indígenas (TIs) no Brasil e as paisagens mais estáveis, como no bioma Amazônico, onde um grande número de UCs e TIs abrange extensas áreas, resultando em um vasto mosaico de proteção para a maior floresta tropical do mundo (Figura 7). Esse arranjo estratégico assegura a manutenção da estrutura mínima da paisagem. No entanto, a figura também destaca a falta de planejamento territorial e ambiental similar para outros biomas, como Cerrado, Caatinga, Pantanal, Mata Atlântica e Pampa. Embora existam algumas UCs com áreas extensas no Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, a maioria é menor, representando uma baixa porcentagem da área total sob proteção dentro desses biomas e carecendo de conectividade estrutural entre eles.

A Mata Atlântica possui uma longa história de transformações paisagísticas, tendo passado por supressões e fragmentações em larga escala desde a colonização portuguesa há mais de 500 anos. O bioma abriga uma parte significativa da população brasileira, concentrada ao longo da zona costeira atlântica, incluindo grandes áreas metropolitanas como São Paulo, Rio de Janeiro e Curitiba (Dean, 2004). Em contraste, outros biomas, como

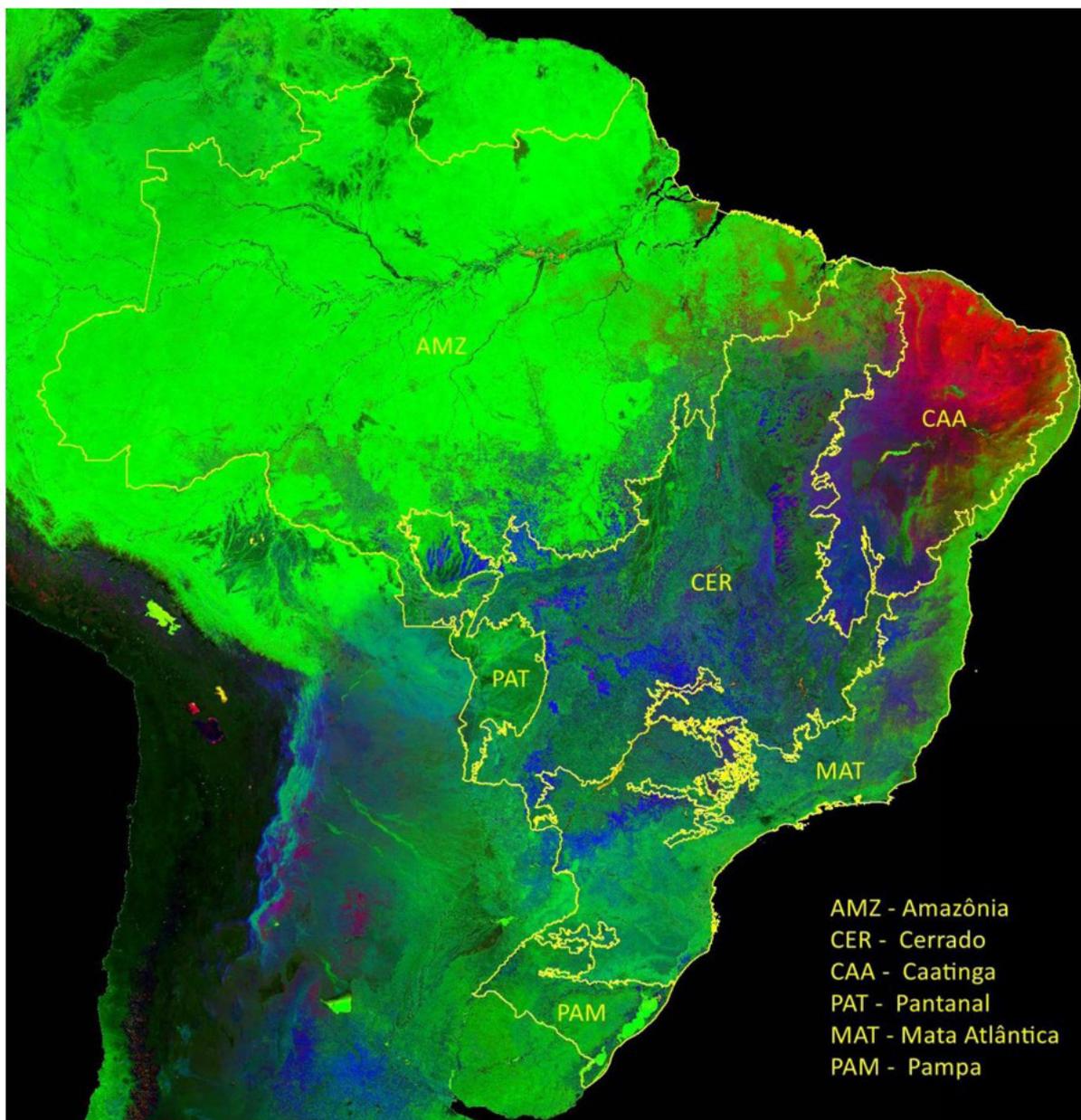


Figura 6 - Biomas Brasileiros (IBGE) sobre o mapa da fenologia. AMZ - Amazônia. CER - Cerrado. CAA - Caatinga, PAT - Pantanal, MAT - Mata Atlântica e PAM - Pampa.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Cerrado, Caatinga, Pantanal e Pampa, passaram por transformações espaciais em larga escala mais recentes, ressaltando a falta de planejamento de conservação para esses territórios.

A relação entre as áreas de cultivo agrícola no Brasil e as variações fenológicas temporais (Figura 8) mostra a alta correspondência espacial das áreas de cultivo de soja com ciclos fenológicos duplos (representados em tons de azul). Esses ciclos, analisados em maior detalhe na Figura 5, estão distribuídos desde a borda sul da Amazônia, atravessando todo o Cerrado, o interior sul da Mata Atlântica e o Pampa. As plantações de cana-de-açúcar, localizadas principalmente no interior sudeste da Mata Atlântica e, em menor grau, no Cerrado e no Pantanal, estão associadas a ciclos fenológicos anuais, assim como a produção de arroz no sul do Brasil, na região de transição entre a Mata Atlântica e parte do Pampa.

SARTOELLO, R.; ALVES FILHO, E.; SMALL, C.



Figura 7 - Unidades de Conservação (Integral e de Uso Sustentável) e Terras Indígenas no território brasileiro sobre a imagem da fenologia.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A produção de café está ligada a ciclos de variação da vegetação mais perenes, com sua distribuição concentrada no Cerrado e no interior sudeste da Mata Atlântica.

Os resultados da imagem da fenologia, de forma geral, corroboram com a identificação de tipos de paisagens brasileiras propostas por Ross et al. (2022), distinguindo por meio de dados ambientais e socioeconômicos as grandes paisagens produtivas e de conservação no Brasil.

CONCLUSÃO

A análise espaço-temporal da série EVI MODIS revela uma significativa partição da variância, com as três primeiras dimensões representando a maior parte da variabilidade temporal.

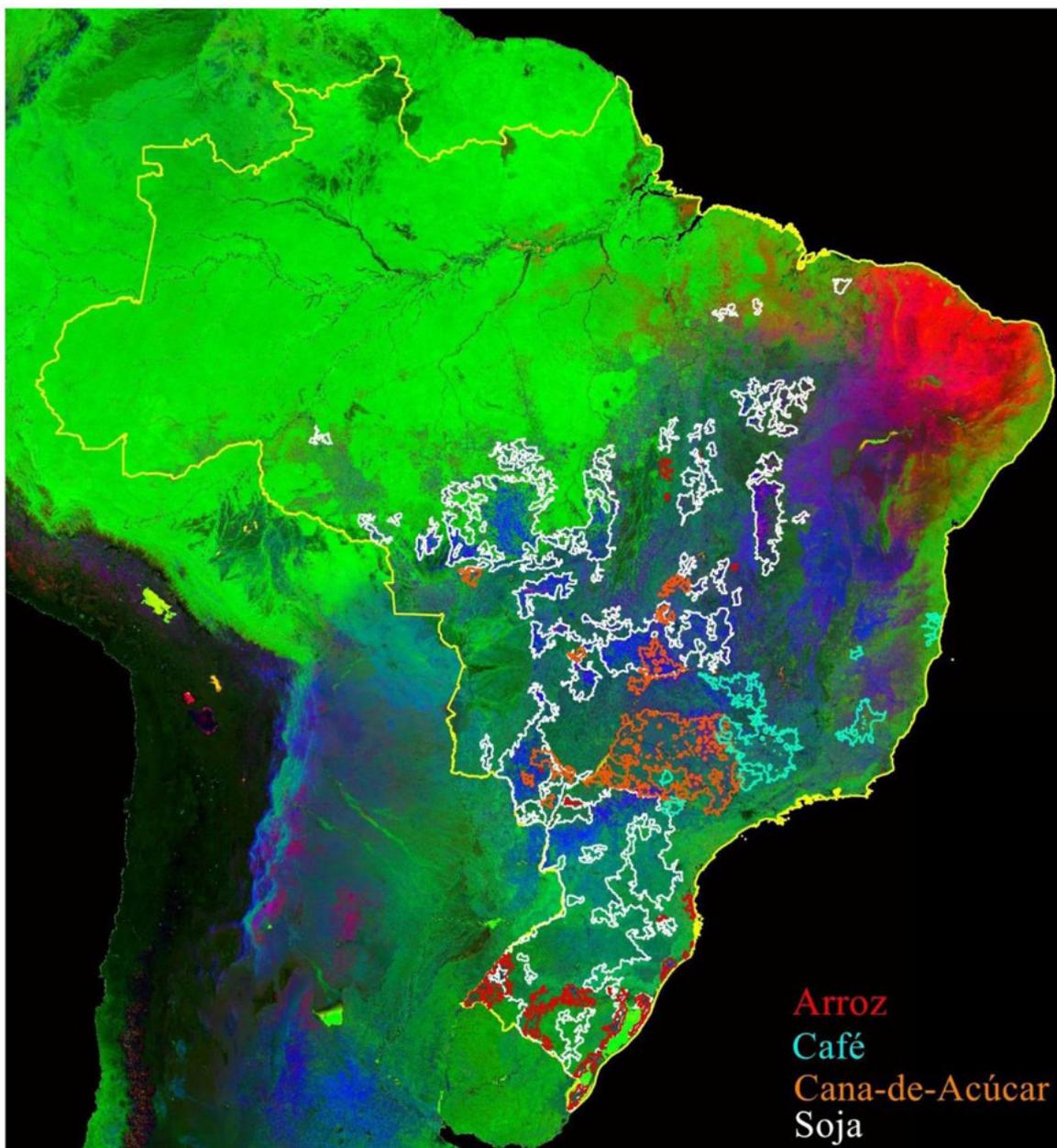


Figura 8 - Culturas agrícolas de soja, cana-de-açúcar, café e arroz no território brasileiro (2019-2021) sobre a imagem da fenologia. Fonte: Elaborado pelos autores.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Essas dimensões delineiam padrões fenológicos distintos correspondentes à vegetação perene, ciclos anuais e semestrais, bem como uma categoria não vegetada com variância mínima.

A imagem de frações fenológicas derivada demonstra padrões espaciais alinhados com as zonas climáticas e biomas do Brasil, fornecendo maior detalhe espacial em comparação com os mapas existentes em escala continental. Apesar da presença de ruído estocástico atribuído à contaminação por nuvens, o modelo representa com precisão a diversidade fenológica da paisagem, capturando tanto fenologias dominantes quanto misturadas com alta fidelidade. Componentes temporais adicionais, particularmente os ciclos duplos indicados pelos EOFs de ordem superior, oferecem mais detalhes sobre as variações de fase regionais, especialmente em áreas onde a fenologia de ciclo duplo é proeminente.

Os resultados revelaram dois tipos principais de paisagens que dominam as variações fenológicas temporais: o primeiro está associado a áreas perenes, principalmente na Amazônia, enquanto o segundo é caracterizado por ciclos anuais e duplos. É importante destacar que, enquanto os ciclos duplos ou semestrais estão mais facilmente associados à produção agrícola, os ciclos anuais podem ser mais desafiadores para distinguir entre atividades agrícolas e variações na vegetação natural, como áreas de campos e florestas sazonais. Portanto, a relação espacial com áreas produtivas torna-se fundamental nesse tipo de análise.

Isso se aplica a biomas florestais densos, como a Mata Atlântica, áreas com cobertura arbórea mais esparsa, como o Cerrado e a Caatinga, assim como regiões de pastagens, como o Pampa e o Cerrado. Os ritmos fenológicos observados indicam paisagens caracterizadas por práticas agrícolas e de pecuária, marcadas por maior variabilidade anual e semestral.

A dicotomia entre a vasta vegetação perene na Amazônia e os ritmos anuais e semestrais predominantes em outros biomas sugere uma simplificação da diversidade dos ritmos naturais. Essa simplificação implica uma perda de complexidade ecológica e uma consequente redução da biodiversidade, uma vez que os padrões de maior variabilidade anual em áreas manejadas contrastam com os processos evolutivos que ocorrem em ambientes florestais. Tais padrões fenológicos têm implicações críticas para a conservação da biodiversidade e dos processos ecológicos nos biomas florestais brasileiros.

As relações observadas entre áreas protegidas, como Unidades de Conservação associadas a Terras Indígenas e territórios de produção agrícola, ressaltam a importância dessas estratégias na manutenção de estruturas espaciais capazes de sustentar a biodiversidade tropical. No entanto, dada a atual expansão das empresas agrícolas no Brasil, tornou-se evidente a necessidade de expandir a rede de proteção em nível nacional para a maioria dos biomas do país.

A análise fenológica espaço-temporal demonstra um potencial para estudos futuros sobre o monitoramento de padrões de paisagem na escala de Brasil. Pode oferecer embasamentos para a identificação de regiões prioritárias para investigações detalhadas e orientar a formulação de políticas públicas voltadas para a conservação e restauração de biomas.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ANDRADE-LIMA, D.; BIGARELLA, J. J. Paleoenvironmental changes in Brazil. *In*: PRANCE, G. T. (ed.). **Biological diversification in the tropics**. New York: Columbia University Press, 1982. p. 27-40.
- ARAÚJO, S. M. V. G. Origem e principais elementos da legislação de proteção à biodiversidade no Brasil. *In*: GANEM, R. S. (ed.). **Conservação da biodiversidade, legislação e políticas públicas**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2011.
- BEHLING, H. Late Quaternary vegetation, climate and fire history in the Araucaria forest and campos region from Serra Campos Gerais (Paraná), S Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, Amsterdam, v. 97, n. 1-2, p. 109-121, 1997. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0034-6667\(96\)00065-6](http://doi.org/10.1016/S0034-6667(96)00065-6).
- BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física Global: esboço metodológico. **Revista do Instituto de Geografia**, São Paulo, v. 8, p. 141-152, 1972.
- BOARDMAN, J. W. Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition. *In*: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 12., 1989, Vancouver, BC, Canada. **Proceedings [...]**. New York: IEEE, 1989. p. 2069-2072. DOI: <http://doi.org/10.1109/IGARSS.1989.577779>.
- BRASIL. **Unidades de conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2024a. Disponível em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/unidadesdeconservacao>. Acesso em: 22 out. 2024.
- BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Portal de Informações Agropecuárias**. Brasília: CONAB, 2024b. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/mapeamentos-agricolas-downloads.html>. Acesso em: 22 out. 2024.

CARNAVAL, A. C.; MORITZ, C. Historical climate modelling predicts patterns of current biodiversity in the Brazilian Atlantic Forest. **Journal of Biogeography**, Hoboken, v. 35, n. 7, p. 1187-1201, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01870.x>.

DEAN, W. **A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira**. 1. ed. São Paulo: Cia. das Letras, 2004.

DELPOUX, M. Ecosistema e paisagem. **Métodos em Questão**, São Paulo, n. 13, p. 1-23, 1974.

FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Palo Alto, v. 34, n. 1, p. 487-515, 2003. DOI: <http://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>.

FOLEY, J. A. *et al.* Global consequences of land use. **Science**, Washington, D.C., v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.1111772>. PMID:16040698.

FLENLEY, J. R. Tropical forests under the climates of the last 30,000 years. **Climatic Change**, London, v. 39, n. 2, p. 177-197, 1998. DOI: <http://doi.org/10.1023/A:1005367822750>.

GLOBAL FOREST WATCH. **Monitoramento de Florestas Projetado para a Ação**. 2024. Disponível em: <https://www.globalforestwatch.org>. Acesso em: 17 set. 2024.

HAFFER, J. Speciation in Amazonian forest birds. **Science**, Washington, D.C., v. 165, n. 3889, p. 131-137, 1969. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.165.3889.131>. PMID:17834730.

HAWKINS, E. *et al.* Unprecedented changes in global temperature over the past 2,000 years. **Nature Climate Change**, London, v. 13, n. 2, p. 131-138, 2023.

HOORN, C. *et al.* Amazonia through time: andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. **Science**, Washington, D.C., v. 330, n. 6006, p. 927-931, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.1194585>. PMID:21071659.

HUETE, A. *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).

HUETE, A.; JUSTICE, C.; VAN LEEUWEN, W. **MODIS Vegetation Index (MOD13): algorithm theoretical basis document**. Washington, D.C.: NASA, 1999. p. 295-309.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Agrícola Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/ibge-digital.html>. Acesso em: 22 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Biomás**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/15842-biomas.html?&t=downloads>. Acesso em: 22 out. 2024.

INSTITUTO INTERNACIONAL DE PESQUISA PARA O CLIMA E A SOCIEDADE – IRIDL. **USGS LandDAAC MODIS version_006**. 2024. Disponível em: http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.USGS/.LandDAAC/.MODIS/.version_006/. Acesso em: 22 out. 2024.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da região nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A. *et al.* (ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. v. 1, p. 213-233. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/J8LNKAN8RW/36G82NU>. Acesso em: 22 out. 2024.

LEDRU, M. P. *et al.* Paleoclimate changes during the last 100,000 yr from a record in the Brazilian Atlantic rainforest region and interhemispheric comparison. **Quaternary Research**, Cambridge, v. 64, n. 3, p. 444-450, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.08.006>.

LORENZ, E. N. **Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction**. Cambridge: MIT, 1956. (Statistical Forecasting Project, n. 48).

MACGREGOR, G. R.; NIEUWOLT, S. **Tropical climatology: an introduction to the climates of low latitudes**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

MARENGO, J. A. *et al.* Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, Hoboken, v. 29, n. 15, p. 2241-2255, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1002/joc.1863>.

MARTIN, L. *et al.* **Mapa geológico do Quaternário Costeiro do Estado da Bahia**. Salvador: Secretaria de Minas e Energia, Governo do Estado da Bahia, 1980.

MAYLE, F. E. *et al.* Responses of Amazonian ecosystems to climatic and atmospheric carbon dioxide changes since the last glacial maximum. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences**, London, v. 359, n. 1433, p. 499-514, 2004. DOI: <http://doi.org/10.1098/rstb.2003.1434>. PMID:15212099.

MORLEY, R. J. **Origin and evolution of tropical rainforests**. New York: Wiley, 2000.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA – FAO. Fundo para o Desenvolvimento de Povos Indígenas da América Latina e Caribe – FILAC. **Povos indígenas e comunidades tradicionais e a governança florestal**. Roma, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/americas/priorities/indigenas-gobernanza-bosques/es>. Acesso em: 22 out. 2024.

PREISENDORFER, R. W. **Principal component analysis in meteorology and oceanography**. Amsterdam: Elsevier, 1988.

RIBAS VILAS, J. Planificación y gestión del paisaje rural. In: BOLÓS, M. (ed.). **Manual de ciência del paisaje: teoria, método y aplicaciones**. Madrid: Masson, 1992.

ROSS, J. L. S. *et al.* (ed.). **Ordenamento territorial do Brasil: potencialidades naturais e vulnerabilidades sociais**. Osasco: Ed. dos Autores, 2022. 585 p. DOI: <http://doi.org/10.29327/560402>.

ROUGERIE, G.; BEROUTCHACHVILI, N. **Geosystemes et paysages**: Bilian et méthodes. Paris: Armand Colin, 1991. 302 p.

SALGADO-LABOURIAU, M. L. **História ecológica da Terra**. São Paulo: Edgard Blücher, 1994.

SETTLE, J. J.; DRAKE, A. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 14, n. 6, p. 1159-1177, 1993. DOI: <http://doi.org/10.1080/01431169308904402>.

SHEPARD, G. E. *et al.* Miocene drainage reversal of the Amazon River driven by plate-mantle interaction. **Nature Geoscience**, London, v. 3, n. 12, p. 870-875, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1038/ngeo1017>.

SILVA, L. G. *et al.* Patch size, functional isolation, visibility and matrix permeability influences Neotropical primate occurrence within highly fragmented landscapes. **PLoS One**, São Francisco, v. 10, n. 2, p. e0114025, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0114025>. PMID:25658108.

SMALL, C. The landsat ETM+ spectral mixing space. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 93, n. 1-2, p. 1-17, 2004. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.007>.

SMALL, C. Spatiotemporal dimensionality and time-space characterization of multitemporal imagery. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 124, p. 793-809, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.031>.

SMALL, C.; MILESI, C. Multi-scale standardized spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 136, p. 442-454, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.024>.

SOUSA, D.; SMALL, C. Global cross calibration of Landsat spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 192, p. 139-149, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.033>.

SOUSA, D.; SMALL, C. Which vegetation index? Benchmarking multispectral metrics to hyperspectral mixture models in diverse cropland. **Remote Sensing**, Basel, v. 15, n. 4, p. 971, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs15040971>.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

Contribuição dos autores

Ricardo Sartorello: Conceituação, Processamento e Análise dos Dados, Revisão Bibliográfica, Escrita e revisão de todos os tópicos.

Edson Alves Filho: Levantamento e consolidação dos dados, Revisão Bibliográfica, Escrita e revisão da Introdução, Discussão e Conclusão.

Christopher Small: Supervisão, Processamento e Análise dos Dados, Revisão Bibliográfica, Escrita dos Métodos e Resultados, Revisão de todos os tópicos.

Editores do artigo

Gustavo Schacht, Sueli Angelo Furlan e Karine Vargas.

Recebido: Out. 22 2024

Aceito: Nov. 14 2024

SARTOELLO, R.; ALVES FILHO, E.; SMALL, C.