



## Identificação das Mudanças Espaço-temporais nos Biomas Brasileiros por Intermédio da Análise de Componentes Principais (ACP)

### *Identification of Spatio-temporal Changes in Brazilian Biomes through Principal Component Analysis (PCA)*

Letícia Figueiredo Sartorio<sup>1</sup> e Éder Leandro Bayer Maier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, Brasil. [leticia.sartorio98@gmail.com](mailto:leticia.sartorio98@gmail.com).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6936-9939>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande, Instituto de Ciências Humanas e da Informação, Rio Grande, Brasil. [edermaier@gmail.com](mailto:edermaier@gmail.com).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3614-6936>

Recebido: 12.2021 | Aceito: 03.2022

**Resumo:** O artigo apresenta uma análise espaço-temporal das mudanças no uso e cobertura da terra dos Biomas brasileiros a partir do uso dos dados do projeto MapBiomas e da Análise de Componentes Principais. Possibilitando agrupar padrões espaciais que representam as principais mudanças ambientais e uma análise temporal da substituição de sistemas ambientais naturais em sistemas agrícolas ou urbanos. Os dados foram disponibilizados pelo MapBiomas, coleção 4.1, para o período entre 1985 e 2018, processados na plataforma Google Earth Engine e representados em mapas temáticos elaborados no QGIS. A Análise de Componentes Principais possibilitou a redução do conjunto de dados de 34 imagens para duas Componentes Principais, as quais representam 84,28% da variância. Os resultados indicaram que a primeira componente principal está associada às estruturas dos sistemas ambientais dos biomas brasileiros e a segunda componente está relacionada aos processos de mudanças do uso e cobertura da terra, sendo que a mudança denominada de: 1) Perda de Superfície com Água; 2) Barragens ou áreas Alagadas; 3) Processos Naturais e Silvicultura e 4) Conversão de Áreas Naturais em Urbanas ou Agropecuárias correspondem a 0,081%, 0,12%, 1,45% e 13,17% do território brasileiro, respectivamente. Nesse contexto, o Sul da Amazônia e o Cerrado são os biomas que apresentaram as mudanças espaço-temporais com maiores dimensões espaciais e as mais rápidas, predominantemente entre 1990 e 2005. Por fim, ressalta-se o potencial da técnica de Análises de Componentes Principais como ferramenta de identificação de padrões espaço-temporais das mudanças nos Biomas brasileiros.

**Palavras-chave:** MapBiomas. Google Earth Engine. Monitoramento Ambiental.

**Abstract:** This article explores a spatio-temporal analysis of changes in land use and cover in Brazilian Biomes using data from the MapBiomas project and Principal Component Analysis. Making it possible to group spatial patterns that represent the main environmental changes and a temporal analysis of the replacement of natural environmental systems in agricultural or urban systems. The data is MapBiomas, collection 4.1, for the period between 1985 and 2018, processed in the Google Earth Engine platform and represented in thematic maps prepared in QGIS. The Principal Component Analysis enabled the reduction of the dataset from 34 images to two Principal Components, which represent 84.28% of the variance. The results indicated that the first principal component is associated with the structures of the environmental systems of Brazilian biomes and the second component is related to the processes of change in land use and land cover, with the change being called: 1) Water Surface Loss; 2) Dams or flooded areas; 3) Natural Processes and Planted Forestry and 4) Conversion of Natural Areas into Urban or Agricultural Areas correspond to 0.081%, 0.12%, 1.45%, and 13.17% of the Brazilian territory, respectively. In this context, the southern Amazon and the Cerrado are the biomes with the largest and fastest spatial-temporal changes, predominantly between 1990 and 2005. Finally, it emphasizes the potential of the Principal Component Analysis technique as a tool for identifying spatio-temporal patterns of changes in Brazilian Biomes.

**Keywords:** MapBiomas. Google Earth Engine. Environmental Monitoring.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas houveram significativos avanços no campo do sensoriamento remoto, como o lançamento de novos satélites (*Landsat 7, 8 e 9, série CBERS, série Sentinel, série Terra/Aqua, série SPOT, etc.*) e as melhorias em relação à resolução espacial, temporal, espectral e radiométrica (BORGES; PACHÊCO; SANTOS, 2015). Isso culminou em um crescimento na aquisição de dados da superfície terrestre com maior qualidade, que possibilitam a realização de monitoramentos e pesquisas em diversas escalas espaço-temporais.

Para o monitoramento de sistemas naturais os avanços alcançados pelo sensoriamento remoto facilitaram a realização de estudos de detecção de mudanças, classificações de imagens, cálculo de índices espectrais, etc. Isso ocorre, pois, há disponível um extenso leque de imagens orbitais com uma vasta cobertura territorial e temporal (LI et al., 2020). Assim, a identificação de mudanças ambientais se torna mais precisa e rápida, auxiliando no processo de planejamento ambiental e na tomada de decisões. Entretanto, com o fácil acesso a imagens hiperespectrais e a extensos bancos de dados de imagens (como a série *Landsat*), o desafio atual é de como processar essa abundante quantidade de dados (BORGES; PACHÊCO; SANTOS, 2015; LI et al., 2020) e extrair informações representativas, por meio da formulação de sínteses espaço-temporais.

Neste cenário de *big data* e de novas técnicas de processamento de dados em nuvem, ocorre uma revolução no sensoriamento remoto e no processamento digital de imagens. A plataforma *Google Earth Engine* - GEE emerge neste cenário e disponibiliza um extenso catálogo de imagens — como imagens *Sentinel, Modis* e *Landsat* — e uma estrutura de processamento em nuvem com grande capacidade computacional. Além de diversas funções e algoritmos de aprendizado de máquina que possibilitam o processamento de enormes volumes de dados. Assim, o GEE é uma excelente ferramenta para o processamento automático de dados ao nível regional, nacional e global. Tornando possível a análise de quantidades significativas de imagens de sensoriamento remoto e a extração de informações de grandes séries temporais, auxiliando nas pesquisas voltadas ao monitoramento ambiental em pequena escala, as classificações de uso e cobertura de terra e as mudanças climáticas (AMANI et al., 2020; TAMIMINIA et al., 2020; LI et al., 2020).

Projetos como o MapBiomias utilizam mais de 30 anos de imagens da série de satélites *Landsat* para produzir o mapeamento anual do uso e cobertura da terra dos biomas brasileiros. Para isso, o projeto utiliza a plataforma de processamento em nuvem GEE e técnicas de classificação automática com aprendizado de máquina (MAPBIOMAS, 2020). Assim, esse projeto oferece um banco de dados completo referente ao uso e cobertura da terra do território brasileiro. Diversos estudos usaram os dados do MapBiomias, mas nota-se uma demanda por investigações que englobem o território nacional e que sintetizem esse banco de dados. Considerando que existem técnicas de estatística que minimizam a redundância dos dados e produzem modelos espaciais que representam os maiores índices de variância.

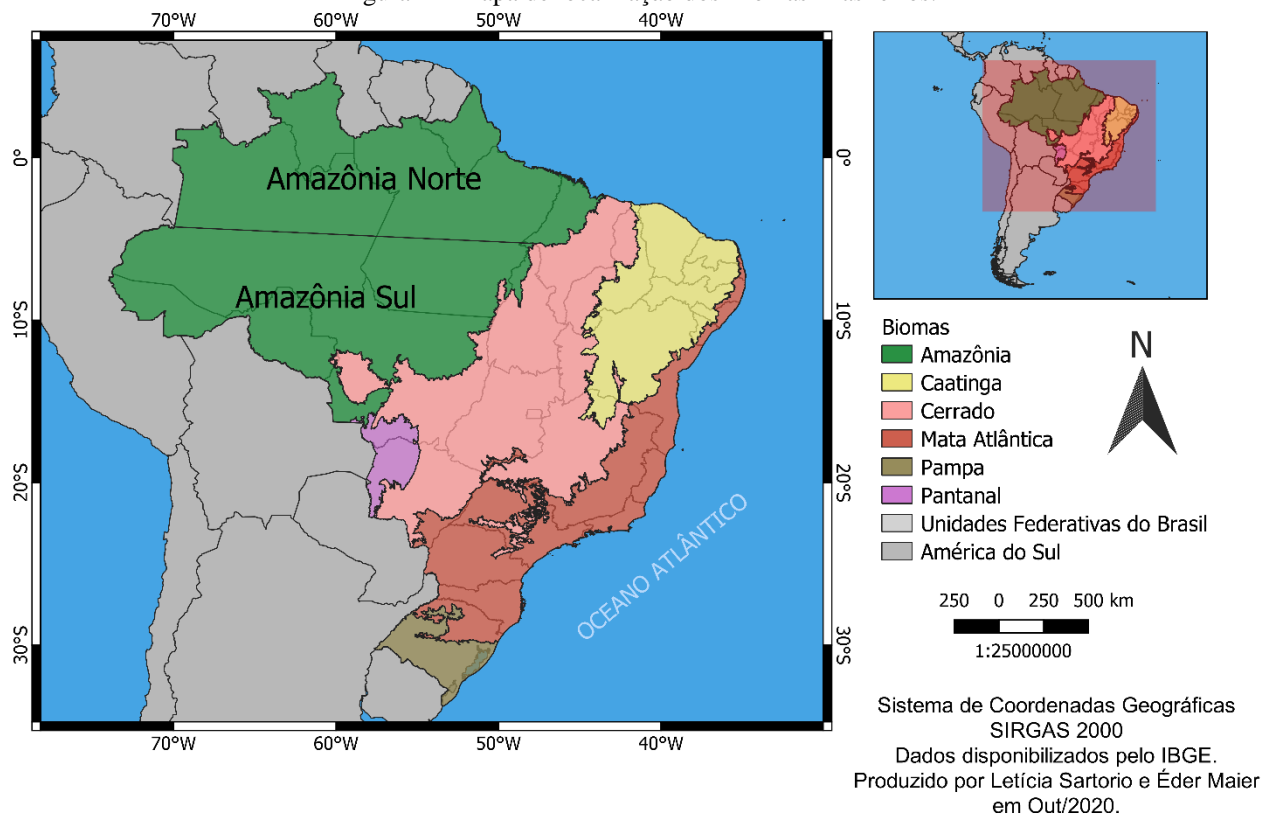
Portanto, o objetivo deste trabalho é apresentar a potencialidade da técnica de Análise de Componentes Principais para a identificação de mudanças espaço-temporais nos Biomas brasileiros, e auxiliar no monitoramento ambiental em pequena escala cartográfica. Para atingir tal objetivo será analisado o banco de dados de uso e cobertura da terra do MapBiomias entre os anos de 1985 e 2018 através da plataforma GEE.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo corresponde aos biomas do Brasil, sua distribuição espacial está apresentada na Figura 1. No território brasileiro há seis Biomas, todos ricos em biodiversidade devido a sua vasta fauna e formações vegetais. Sendo eles: Amazônia, Cerrado, Pantanal, Caatinga, Mata Atlântica e Pampa (NASCIMENTO; RIBEIRO, 2017).

Figura 1 – Mapa de localização dos Biomas Brasileiros.



Elaboração: Os Autores (2021).

## 2.2 Dados e Materiais

Neste estudo foram utilizados dados do projeto MapBiomas, que mapeia o uso e cobertura da terra dos Biomas brasileiros a partir de imagens da série *Landsat*. Essas imagens orbitais são processadas em nuvem e classificadas de forma automática com algoritmos de aprendizado de máquina a partir da plataforma GEE. Os dados apresentam resolução espacial de 30 metros e resolução temporal de um ano para o período entre 1985 e 2018. Os arquivos *raster* contém 20 classes que representam as categorias de uso e cobertura da terra variando dos valores 3 a 33, os dados utilizados correspondem ao nível três de detalhamento e possuem 86,4% de acurácia global (MAPBIOMAS, 2020). Os dados de entrada do MapBiomas para os anos entre 1985 e 2018 estão organizados em um único arquivo com 34 imagens. Cada imagem/mapa de uso e cobertura da terra está disposta como uma camada da imagem de entrada e representa um determinado ano, compondo a dimensão temporal do dado. Portanto, uma imagem específica corresponde a um ano mapeado com informações categóricas, no qual os valores de 3 a 33 representam as classes observadas. Também foram utilizados arquivos *shapefiles* dos Biomas brasileiros disponibilizados pelo IBGE. Para o processamento dos dados foi utilizada a plataforma GEE e o software QGIS versão 3.10.

## 2.3 Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística multivariada que objetiva retirar as informações redundantes do banco de dados, usando a mensuração da variância/covariância e combinações lineares dos dados originais que formam as Componentes Principais (CP), as quais não apresentam correlação entre si (MINGOTI, 2005). A ACP procura alcançar uma redução da dimensão dos dados, pela remoção de informações redundantes dentro do conjunto de dados iniciais, preservando assim, as componentes que possuem os maiores valores de variância (MANLY, 2008).

Segundo Reis (2001) as CP são mensuradas e ordenadas de forma decrescente de importância, sendo que a 1<sup>o</sup> CP explica o máximo possível de variância, a 2<sup>o</sup> CP o máximo de variância que ainda não foi explicada, e a última é a que possui a menor contribuição para explicar a variância total do conjunto de dados

originais. Cada combinação linear produzida explica o máximo possível de variância não explicada e tem que ser ortogonal as demais combinações já produzidas (MINGOTI, 2005).

As CP não possuem correlação entre si, assim cada uma explica fatores distintos sobre a variação dos dados. Desta forma, se objetiva que com a ACP seja possível explicar a maior porcentagem de variância com poucas componentes. Em outras palavras, as componentes que explicam baixas porcentagens de variância são desconsideradas, o que ocasiona uma redução da dimensão dos dados (MANLY, 2008).

Portanto, por intermédio da ACP busca-se a partir de  $p$  variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_p$  formar combinações lineares  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$  que não estejam correlacionados entre si e que apresentem variância em ordem decrescente  $Var(Z_1) \geq Var(Z_2) \dots \geq Var(Z_p)$  (MANLY, 2008). Sendo  $Z_1$  expresso na Eq. 1 e estando sujeito que a soma dos quadrados das constantes  $a$  deve ser igual a 1:

$$Z_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p \quad (1)$$

As demais CP são mensuradas da mesma forma, considerando que as CP devem apresentar correlação igual a zero entre si. Existem dois conceitos importantes dentro da ACP, que são o coeficiente de correlação e a covariância. O coeficiente de correlação mede a dependência entre as variáveis, e a covariância indica como que as variáveis variam de forma conjunta (ZANOTTA; FERREIRA; ZORTEA, 2019).

Na aplicação prática da ACP deve-se calcular a matriz de covariância ou correlação e identificar os autovalores dessa matriz através de procedimentos matemáticos, e estes representam as variâncias das CP (MANLY, 2008). Estando estes autovalores ordenados como  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ , no qual  $Var(Z_1) = \lambda_1$  e as constantes  $a$  pertencem ao autovetor correspondente. Ademais, a soma das variâncias das CP equivalem a soma das variâncias dos dados originais, desta forma as CP representam o somatório da variação dos dados originais (MANLY, 2008; REIS, 2001). Toda componente mensurada terá um autovetor com um autovalor que representa os dados que causam as maiores porcentagens da variância e podem explicar os padrões de mudança ao longo do espaço e do tempo. O autovetor indica a direção/ângulo que deve ser assumida pela componente, na direção da maior variância em ordem decrescente. Os autovalores correspondem aos valores de variância explicada de cada componente (ZANOTTA; FERREIRA; ZORTEA, 2019).

Essa técnica pode ser aplicada em diversos estudos, como na climatologia e no sensoriamento remoto. Visto que permite reduzir a dimensão de informações proveniente das bandas espectrais e manter a variação do dado, obtendo bons resultados devido ao seu potencial de indicar alterações espaço-temporais (DENG et al., 2008). A ACP é útil em aplicações voltadas ao sensoriamento remoto devido ao comumente relacionamento estatístico entre as bandas multiespectrais, medido pelo coeficiente de correlação. Uma alta correlação entre as bandas é chamada de redundância de informação, devido ao fato de não acrescentar um dado novo na análise (ZANOTTA; FERREIRA; ZORTEA, 2019). Dessa forma, a ACP consegue condensar a informação em um menor número de canais, reduzindo a demanda computacional para uma classificação de imagens, por exemplo (TSO, MATHER, 2009). A redundância de informações também ocorre em grandes bases de dados categóricos, como no mapeamento do MapBiomias. A técnica ACP também é eficaz para identificar padrões espaço-temporais nos dados (GUPTA et al., 2013).

Deve-se ressaltar que a primeira Componente Principal possui a maioria da informação que é comum entre as/os bandas/dados. Por outro lado, as variações de uso e cobertura da terra são apresentadas nas demais componentes, sendo que a segunda Componente Principal é considerada muito importante na análise de mudanças do uso e cobertura da terra (MALDONADO, 1999; ANTUNES, 2012).

## 2.4 Procedimentos no Google Earth Engine

O processamento dos dados do MapBiomias foi realizado na plataforma GEE com a linguagem *JavaScript* e os dados foram analisados a nível de Biomias para posterior união no software QGIS. O Bioma Amazônia teve que ser dividido em duas áreas, Norte e Sul, por conta da grande extensão territorial e a limitação da capacidade de processamento. A Figura 1 apresenta a divisão dos Biomias para processamento, sendo que cada área foi analisada separadamente e unida para a confecção dos mapas. A Figura 2 contém um

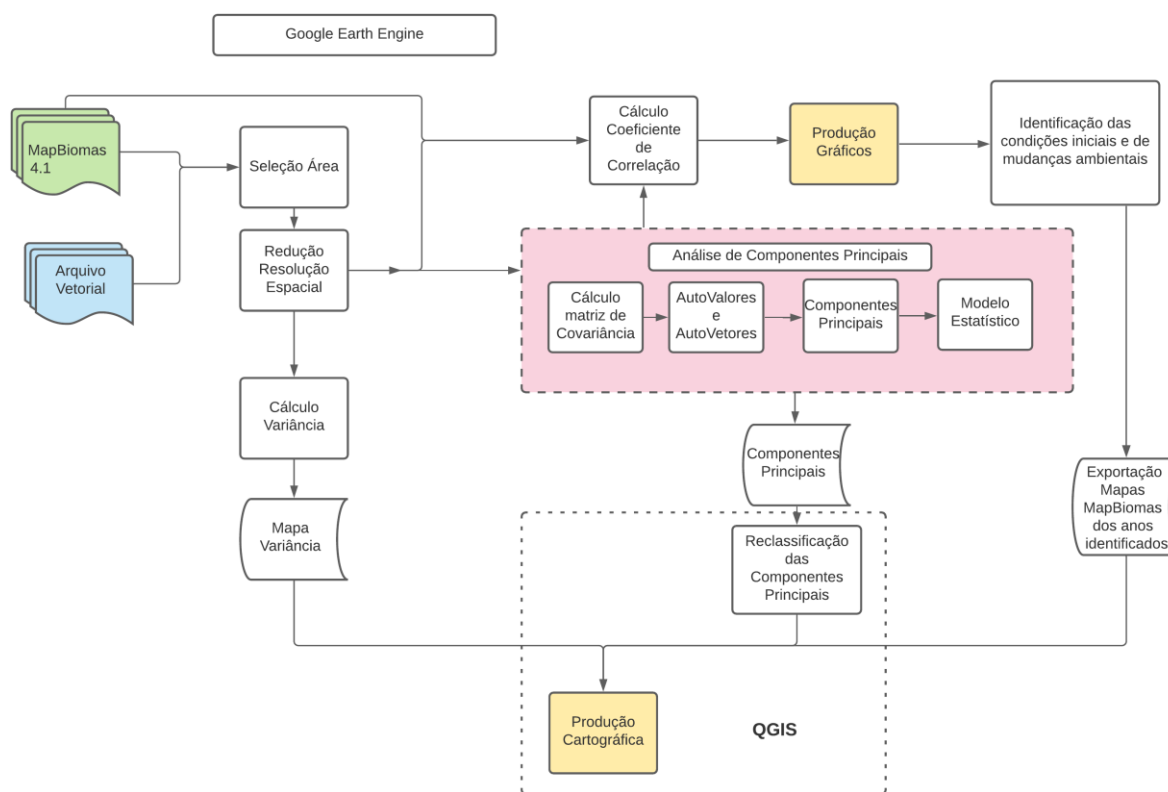
fluxograma apresentando as etapas da metodologia. O arquivo utilizado para processamento possui 34 imagens que correspondem a cada ano mapeado (1985-2018), no qual os valores representam as classes de uso e cobertura da terra.

Para processar os dados do MapBiomias na plataforma GEE foi necessário realizar um agrupamento de *pixels* a partir da moda e uma consequente redução na resolução espacial do dado, que passou de 30 metros para 300 metros. Para isso se utilizou a função *ee.reduceResolution*. Tal processo leva a uma perda de detalhamento do dado, mas foi necessário para adequação à capacidade computacional no processamento destas informações.

Após a redução da resolução espacial, se realizou uma caracterização das mudanças do uso e cobertura da terra a partir da mensuração da variância temporal (*ee.Reducer.variance*), tal informação indica a variação/dispersão em relação à sua média (MINGOTI, 2005). O mapa da variância e a sua análise identifica as áreas com maiores alterações no uso e cobertura da terra ao longo do tempo e auxilia na interpretação dos demais resultados.

A ACP no GEE para cada divisão dos Biomas (Figura 1) seguiu as seguintes etapas: 1) transformação da matriz de imagens tridimensional em bidimensional; 2) mensuração da covariância; 3) obtenção das CP a partir das funções ortogonais e 4) avaliação da representação das CP. Por limitações na capacidade do processamento computacional, a ACP foi executada para cada divisão dos Biomas e os produtos cartográficos são mosaicos das 7 divisões. Abaixo segue as etapas executadas com as principais funções do GEE utilizadas.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia.

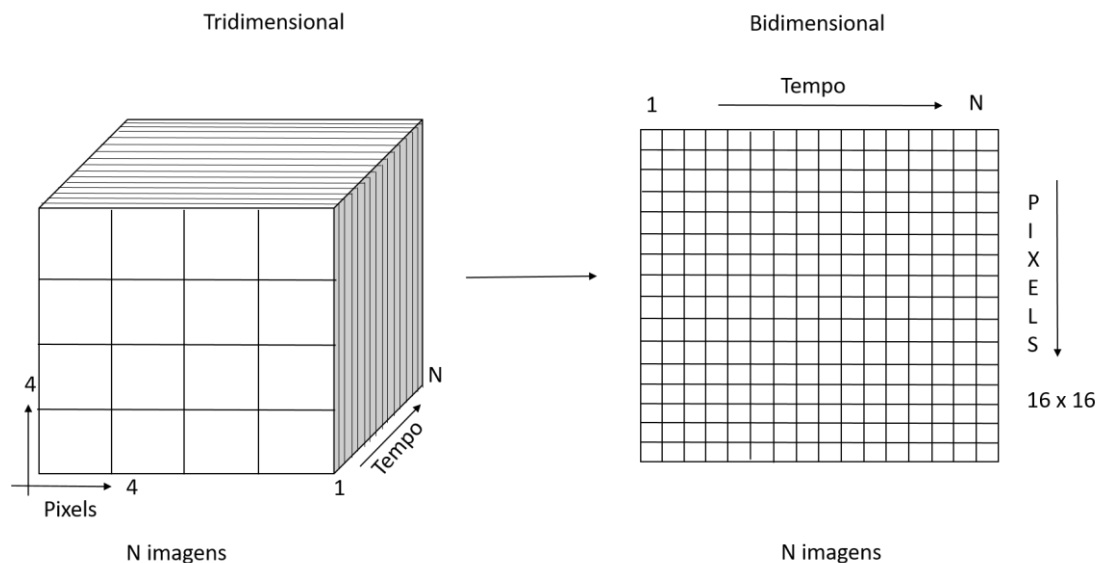


Elaboração: Os autores (2021).

Os dados do MapBiomias são disponibilizados no GEE na forma de um cubo, com 3 dimensões (3D)(Figura 3). Sendo que as camadas representam a dimensão do tempo, e contém os mapas de uso e cobertura da terra. Para a ACP é necessário que os dados estejam em duas dimensões (2D). Por isso, o procedimento exemplificado pela Figura 3 foi realizado. No qual, foi produzida uma matriz 2D a partir de dados 3D para aplicar a técnica estatística. Para isso, as 34 imagens foram dispostas em uma única matriz, onde cada imagem compõe uma coluna e o número de linhas é igual ao número de *pixels* das imagens, a fim de comparar as imagens/anos ao longo do tempo e identificar modelos espaciais originários da análise das CP. A qual utilizou

a matriz de covariância (*ee.Reducer.covariance*) para identificação dos campos da matriz 2D que contém informações redundantes e os campos que geram os maiores índices de covariância ou menor correlação (MINGOTI, 2005; MANLY, 2008).

Figura 3 - Exemplo de Matriz.



Elaboração: Os Autores (2021).

Os dados espaciais com as maiores covariâncias são usados como amostras para a elaboração dos modelos estatísticos oriundos das funções ortogonais, que são chamados de CP. Em outras palavras, foi possível gerar modelos estatísticos que representam os padrões espaciais das principais mudanças do uso e cobertura da terra ao longo do tempo. A identificação dos autovalores e autovetores da matriz de covariância foi realizada pela função *.eigen()*. Adicionalmente, os autovalores foram utilizados para a mensuração da porcentagem da variância explicada por cada Componente Principal, adotando como parâmetros de escolha o interesse nas CP que explicassem a maior porcentagem de variância e limitar a um pequeno número de modelos espaciais, resultando na seleção de duas CP.

Cabe ressaltar que a primeira Componente Principal está geralmente associada ao principal padrão dos dados, e neste estudo se relaciona com a distribuição espacial dos Biomas brasileiros e dos seus usos e coberturas da terra. Já a segunda Componente Principal está normalmente associada a variações nos dados, que podem ser aqui interpretadas como mudanças no uso e cobertura da terra (MALDONADO, 1999; ANTUNES, 2012). Corroborando com a racionalidade das análises dos autores, foi analisado o índice de correlação de Pearson (*ee.Reducer.pearsonsCorrelation()*) entre os modelos espaciais oriundos das CP (1ª e 2ª) com as 34 imagens/mapas de entrada. Esse coeficiente mensura o grau do relacionamento entre duas variáveis, podendo indicar se essa relação se caracteriza como forte (coeficiente próximo de  $\pm 1$ ) ou fraca (coeficiente próximo de 0), e se as variáveis possuem correlação linear positiva ou negativa (TAYLOR, 1990). Sendo assim, os altos valores de correlação (positivos ou negativos) indicam a ocorrência temporal dos modelos espaciais e o contrário é verdadeiro. Assim, as maiores ou menores correlações evidenciam semelhanças, ou divergências entre o modelo estatístico e os dados de entrada, possibilitando atribuir a ocorrência ao longo do tempo dos modelos espaciais das principais mudanças no uso e cobertura da terra. Cada componente possui 34 índices de correlação (dimensão temporal).

A identificação do maior e menor índice de correlação para cada região de análise tornou possível selecionar ao longo do tempo os mapas de uso e cobertura da terra do MapBiomas que mais se aproximavam (maior correlação) e se distanciam (menor correlação) do modelo estatístico da segunda Componente Principal a fim de analisar os padrões espaço-temporais das mudanças identificadas pelas CP. Os mapas selecionados para cada região de análise foram unidos em um único mosaico. Resultando em um mapa com os anos de menor correlação (antes das mudanças) e um mapa com os anos de maior correlação (depois das mudanças).

## 2.5 Procedimentos no QGIS

Após a finalização do processamento no GEE todos os mapas gerados foram exportados, e no QGIS foram unidos em um único mosaico e reprojeto para o *datum* SIRGAS2000. A próxima etapa foi a reclassificação das 1° e 2° CP.

Os valores dos pixels das CP não estão associados aos identificadores das classes de uso e cobertura da terra, por isso, a primeira e a segunda Componente Principal foram reclassificadas no software QGIS, visando identificar os padrões de uso e cobertura da terra (1° CP), e as mudanças no uso e cobertura da terra (2° CP). Para esta reclassificação foram utilizadas amostras, selecionadas de forma supervisionada e por interpretação visual. Para facilitar a interpretação se utilizou de forma conjunta os mapas de uso e cobertura da terra do MapBiomias que apresentavam as maiores e as menores correlações com a segunda Componente Principal, e conseqüentemente mais se distanciavam ou se aproximavam do modelo estatístico. As amostras coletadas tiveram seus valores analisados e foram identificados intervalos de padrões e tipos de mudanças de forma empírica.

A primeira Componente Principal foi reclassificada em 5 intervalos de padrões de uso e cobertura da terra que estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Padrões de uso e cobertura da terra.

Padrões	Intervalo de Valores
Corpos hídricos	-192 até -150
Agricultura consolidada e áreas urbanas	-149 até -95
Pastagem consolidada	-94 até -80
Formação campestre, áreas úmidas, floresta plantada e pastagem recente	-80 até +40
Formações florestais e savânicas	-40 até -11

Elaboração: Os autores (2021).

A segunda Componente Principal foi reclassificada em 5 tipos de mudanças, que estão apresentadas na Tabela 2. Foram mensuradas a porcentagem e a área em quilômetros quadrados, de maneira aproximada, para cada tipo de mudança.

Tabela 2 – Tipos de Mudança do uso e cobertura da terra.

Mudanças	Intervalo de Valores
Perda de superfície com água	-45 até -100
Processos naturais e Silvicultura	-20 até -35 e de -36 até -45
Redundância	-20 até +5 e de -35 até -35.9
Conversão de áreas naturais em urbanas ou agropecuárias	+5 até +45
Barragens ou áreas alagadas	+45 até +77

Elaboração: Os autores (2021).

Por último, foi realizada a produção cartográfica dos resultados visando facilitar a comunicação da informação. Quando possível buscou-se seguir a paleta de cores utilizada pelo MapBiomias.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

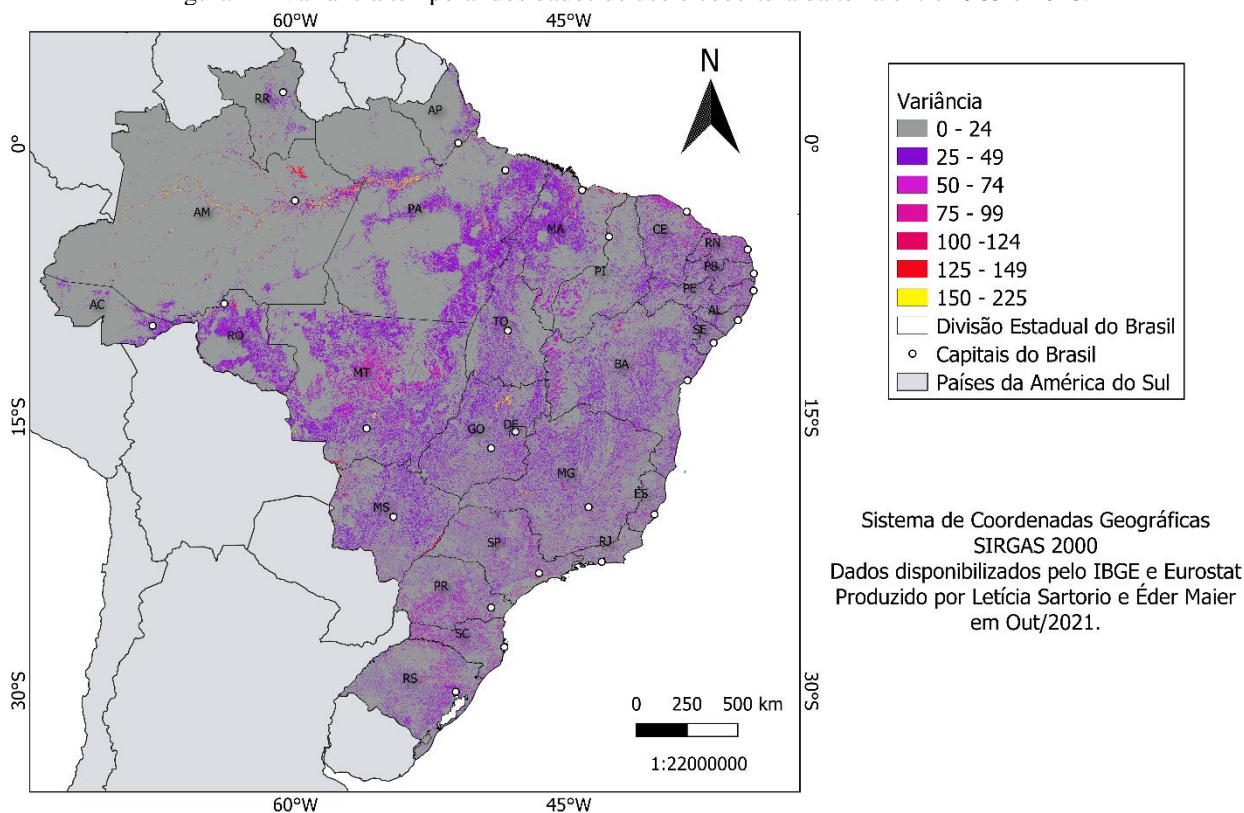
Os resultados alcançados estão divididos em três partes: I) Apresenta o resultado do cálculo da variância temporal, a interpretação dessa informação auxilia na compreensão das mudanças espaço-temporais; II) Principais padrões espaciais identificados com as CP; e III) Relações espaço-temporais entre os usos e cobertura da terra e as CP. Deve-se considerar que os resultados estão conectados e se complementam.

### 3.1 Análise da Variância e Mudanças Espaço-Temporais

O mapa da Figura 4 apresenta a variância dos dados do MapBiomias entre 1985 e 2018, possibilitando caracterizar as principais alterações espaço-temporais. Os valores dessa métrica variam entre zero e 225, sendo

que a magnitude da variância está relacionada com os identificadores das classes. Esses valores dos identificadores não estão ordenados de forma crescente ou decrescente com a variação de classes naturais e antrópicas, assim os valores da variância não indicam diretamente uma maior mudança na natureza, mas subsidiam a identificação e interpretação das áreas com mudanças no uso e cobertura da terra.

Figura 4 – Variância temporal dos dados de uso e cobertura da terra entre 1985 e 2018.



Elaboração: Os Autores (2021).

As áreas com valores da variância em torno de zero, em cinza, (Figura 4) estão relacionadas com situações em que não houve mudança no uso e cobertura da terra ou ocorreu a permanência temporal de duas ou três classes, visto que a variância apresentou um valor baixo. Por exemplo, na floresta Amazônia, no Norte do Brasil, e no interior da Caatinga, no estado do Piauí, que tiveram a manutenção das classes de formação florestal e formação savânica, respectivamente. Por outro lado, foi identificado que os maiores valores da variância (entre 100 e 225 – representado por tons de vermelho, laranja e amarelo) podem ser encontrados no curso do Rio Amazonas, no Pantanal, na divisa entre Mato Grosso do Sul e São Paulo e no Norte do estado de Goiás. Esses casos estão relacionados com flutuações naturais dos níveis de água, ocupações antrópicas nas margens e a implementação de Barragens ou construção de lagos artificiais.

As variações da variância entre 25 e 100 são identificados por tons de roxo e rosa e estão distribuídos ao longo de todos os Biomas do Brasil, podendo estar relacionados ao avanço e ciclos da agropecuária, e a expansão da infraestrutura urbana como, por exemplo, na região do arco do desmatamento no Bioma Amazônia, que se concentra nos estados de Rondônia, Mato Grosso e Pará, e que se estende até o Maranhão e Tocantins. No arco do desmatamento a prática de subtração da vegetação nativa transformou as áreas naturais em campos para a agropecuária ou em áreas urbanas (MATOS, 2016; SOUZA-FILHO et al., 2016). Adicionalmente, observa-se tais transformações na região central do estado do Mato Grosso e na região do MATOPIBA, na qual a prática agropecuária está sendo ampliada desde a década de 1980 e 1990, respectivamente (VIEIRA, 2016). A prática do desmatamento também pode explicar a variância em outras regiões, principalmente no Bioma Cerrado, que até o ano de 2010 teve metade da sua área original modificada (BRASIL, 2014).

Assim, nota-se que a redução do banco de dados pelo cálculo da variância permitiu identificar as principais alterações no uso e cobertura da terra no período observado. Estando estas relacionadas ao



desmatamento, a expansão da agropecuária, a implementação de barragens e a movimentações nos cursos hídricos.

### 3.2 Mapeamento dos padrões espaciais identificados com a Análise de Componentes Principais

A ACP gerou os autovalores que foram avaliados para identificar a porcentagem de variância explicada por cada Componente Principal, conforme a divisão em Regiões de Análise. A Tabela 3 apresenta a porcentagem de variância explicada para as CP selecionadas e a soma da variância total explicada.

Tabela 3 – Porcentagem de Variância explicada por cada Componente Principal e sua soma.

Regiões de Análise	1° CP	2° CP	Soma
Pampa	87,89%	3,42%	91,31%
Pantanal	77,4%	8,85%	86,25%
Caatinga	77,2%	7,08%	84,28%
Cerrado	75,37%	9,97%	85,34%
Mata Atlântica	82,7%	5,74%	88,44%
Amazônia Sul	75,02%	11,43%	86,45%
Amazônia Norte	87,94%	3,59%	91,53%

Elaboração: Os autores (2021).

A análise da variância explicada (Tabela 3) evidenciou que a soma da variância das duas CP ultrapassa 84%, tal resultado é considerado satisfatório pela literatura (MINGOTI, 2005; NEISSE; HONGYU, 2016), pois indica que a partir da ACP foi possível reduzir um conjunto de dados com 34 imagens para duas CP, e representar mais de 84% da variância do banco de dados original. Essa redução (de 34 para duas imagens CP) facilita a análise e compreensão da informação e permite identificar de forma mais ágil e prática as mudanças no uso e cobertura da terra nos Biomas brasileiros.

O modelo estatístico da primeira Componente Principal foi reclassificado em cinco padrões espaciais (Tabela 1) e está apresentado na Figura 5. A primeira Componente Principal indica o principal padrão de distribuição das classes de uso e cobertura da terra, ou seja, apresenta o que há em comum no conjunto de dados. O padrão “Corpos hídricos” (tons de azul) representa áreas cobertas por corpos hídricos como, por exemplo, o Rio Amazonas e afluentes, parte do Rio São Francisco ao Norte da Bahia, o Rio Tiete que atravessa o estado de São Paulo e em áreas no Pará. Normalmente essas áreas apresentam poucas variações do uso e cobertura da terra, exceto quando há processos naturais que alteram a morfologia do leito do rio.

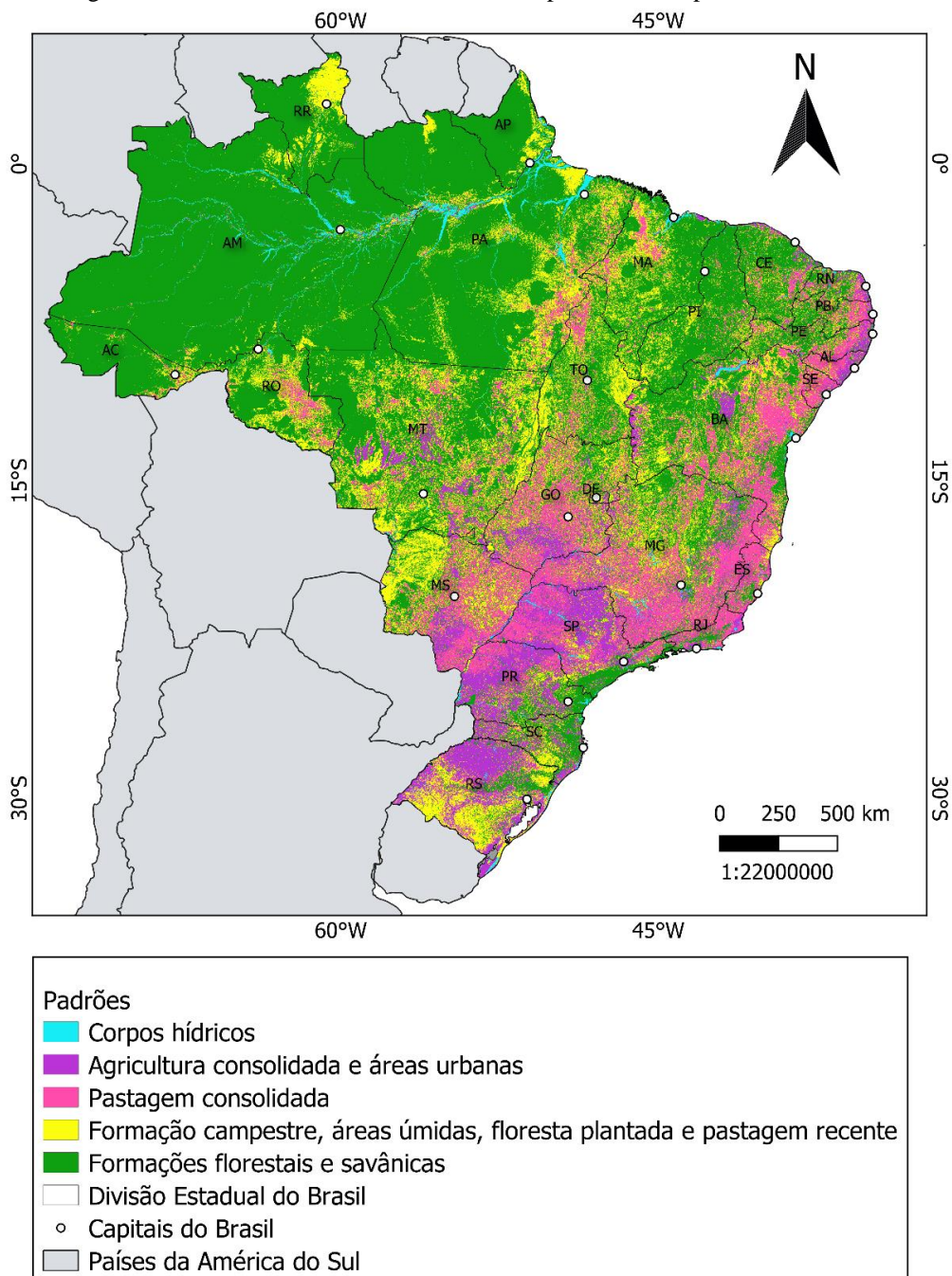
O padrão “Formações florestais e savânicas” pode ser encontrado em tons de verde e se distribuem principalmente no Bioma Amazônia, no Norte do estado do Mato Grosso, na área de transição entre a Caatinga e o Cerrado (cobrindo o estado do Piauí), na divisa entre o Bioma Pampa e a Mata Atlântica no Rio Grande do Sul, e na Serra do Mar que se estende do estado de São Paulo até Santa Catarina. Essa distribuição representa as formações florestais e savânicas que cobrem o território brasileiro e ainda se encontram preservadas, assim podendo ser consideradas como vegetação nativa.

O padrão “Formação campestre, áreas úmidas, floresta plantada e pastagem recente” está representado por tons de amarelo, podemos destacar sua ocorrência no Bioma Pampa, Bioma Pantanal e em áreas de desmatamento mais recente em Rondônia, Pará e Mato Grosso. Nas áreas de desmatamento há a formação e ampliação da “espinha de peixe” com áreas de pastagem recente (SANTOS; LINGNAU, 2017). De forma geral, são áreas que mantiveram suas classes de uso e cobertura da terra por um longo período, como a formação campestre e as áreas úmidas nos Biomas Pampa e Pantanal. Mas, que podem ter passado por alguma mudança antrópica em algum ponto da série temporal, como a implementação de pastagens ou de florestas plantadas.

Em rosa temos o padrão “Pastagem consolidada”, que está distribuída ao longo do território brasileiro, com concentração espacial nos Biomas Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, e em Rondônia, que são regiões com presença de pastagens antigas (GUIMARÃES, 2016). Esse padrão também é encontrado em desmatamentos anteriores a 1985, normalmente associados a primeiras áreas de pastagens e aberturas de

acesso, que formam a “espinha de peixe” do desmatamento e que a partir dela surgem as novas áreas desmatadas devido a facilidade de acesso (SANTOS; LINGNAU, 2017).

Figura 5 – Modelo Estatístico da Primeira Componente Principal Reclassificada.



Sistema de Coordenadas Geográficas - SIRGAS 2000  
 Dados disponibilizados pelo IBGE e Eurostat  
 Produzido por Letícia Sartorio e Éder Maier em Out/2021.

Elaboração: Os Autores (2021).

Por fim, o padrão “Agricultura consolidada e áreas urbanas” está apresentado em tons de roxo. Estes estão concentrados no Noroeste e Sul do Rio Grande do Sul, no Oeste do Paraná e Santa Catarina, no Sul do Mato Grosso do Sul, no Norte de São Paulo, no Sul de Goiás, na área central do estado de Mato Grosso, no Oeste da Bahia e no litoral do Nordeste. As áreas no Sul, Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste brasileiro apresentam uma forte concentração de atividades agrícolas consolidadas, como monoculturas de soja e cana-de-açúcar (GUIMARÃES, 2016; IBGE, 2020). As grandes áreas urbanas se distribuem principalmente na faixa litorânea do Brasil, devido a concentração de habitantes e de grandes metrópoles (LIMA, 2016).

Portanto, a primeira Componente Principal permite compreender de forma sintetizada o padrão de distribuição das classes de uso e cobertura da terra nos Biomas brasileiros ao longo de 34 anos. Abrangendo as estruturas espaciais, sendo elas naturais ou de natureza transformada, que indicam a configuração e distribuição dos elementos espaciais que compõem os Biomas brasileiros no período entre 1985 e 2018. Permitindo compreender essa dimensão do banco de dados de maneira condensada.

A segunda Componente Principal está relacionada com as mudanças no uso e cobertura da terra. Em vista disso, se torna possível interpretar e identificar as principais mudanças nos Biomas brasileiros ao decorrer da série temporal a partir desta componente, pois a mesma representa as principais variações no banco de dados. Para facilitar a interpretação a segunda Componente Principal foi reclassificada em cinco tipos de mudanças (Tabela 2). A Figura 6 mostra o modelo espacial da segunda Componente Principal reclassificada.

A partir do mapa da Figura 6 nota-se a predominância da mudança “Conversão de áreas naturais em urbanas ou agropecuárias”, representada pela cor lilás, e que esta classe se distribui por grandes extensões do território. Assim podemos considerar que o crescimento urbano e a expansão da agropecuária são os principais vetores que causaram as mudanças no uso e cobertura da terra no Brasil.

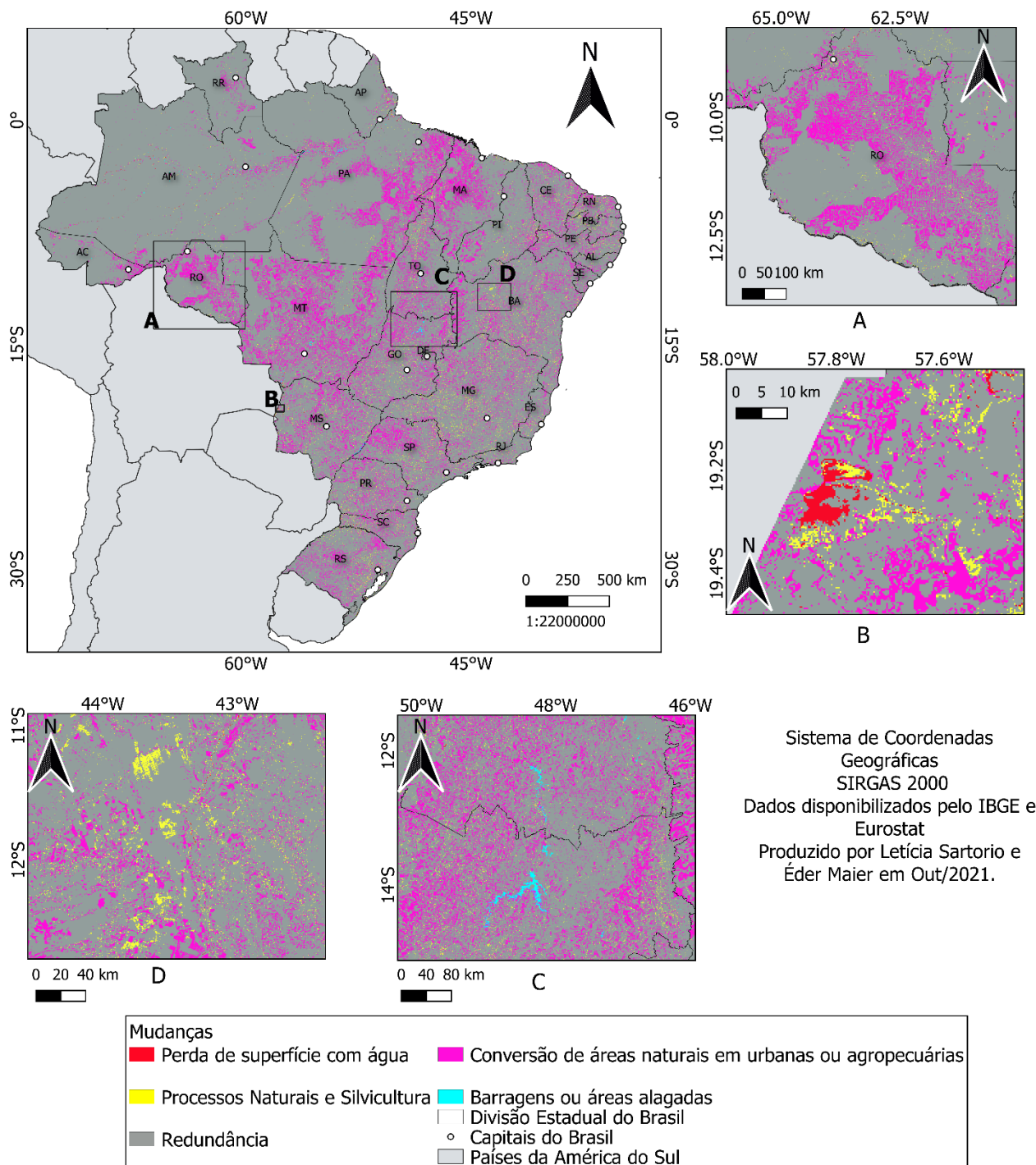
A mudança “Perda de superfície com água” corresponde a substituição de áreas cobertas por água (rios, lagos, etc) por outras classes de uso e cobertura da terra. Esse tipo de mudança está identificada pela cor vermelha, e correspondeu a 0,081% do território nacional, com área superior a 7 mil quilômetros quadrados. Com destaque nos entornos do Rio Amazonas e no Bioma Pantanal (Zoom B na Figura 6), no estado do Mato Grosso, onde as mudanças podem ser causadas por fatores naturais como o deslocamento da posição do leito dos rios Amazônicos ou a variabilidade da extensão do alagamento no Pantanal. Os estudos de IBGE (2020) e Souza et al. (2020) também apontaram essa mudança.

A mudança “Processos naturais e Silvicultura” representa áreas nas quais foram encontradas transições entre classes de dunas e de sistemas agropecuários para classes de formação florestal, formação savânica, formação campestre e floresta plantada (Silvicultura). Podendo ser considerado como um processo natural (exceto a ocorrência de floresta plantada) a transformação de áreas antrópicas (agricultura e pecuária) em áreas naturais (formações vegetais). Esse tipo de mudança abrange 1,45% da área total do Brasil, com uma extensão de mais de 127 mil quilômetros quadrados. A Figura 6 mostra a distribuição espacial da mudança na cor amarela, havendo uma concentração dessa mudança nos estados de Minas Gerais, Bahia (Zoom D na Figura 6), São Paulo, Goiás, Mato Grosso, no Norte do Tocantins, no Leste do Rio Grande do Sul, no Oeste de Paraná e Santa Catarina e em estados do Nordeste. IBGE (2020) aponta sobre o avanço da silvicultura nos biomas brasileiros, o que também foi identificado por meio da ACP.

O tipo de mudança “Redundância” corresponde a áreas nas quais não ocorreram mudanças ou houveram mudanças brandas, visto que as classes do uso e cobertura da terra mantiveram-se no decorrer dos 34 anos ou são áreas que podem ser representadas por um número maior de componentes. Essa categoria de mudança corresponde a 85,18% do território nacional, mais de 7 milhões e 474 mil quilômetros quadrados. Adicionalmente, essa extensão de 85,18% do território não são exclusivamente formações naturais preservadas, tendo em vista que ocorreram diversas mudanças no uso e cobertura da terra anteriormente ao ano de 1985 que se mantiveram. A área de redundância identificada tem certa correspondência espacial com as áreas preservadas, principalmente na Amazônia, encontrados em IBGE (2020) e Souza et al. (2020).

A mudança “Conversão de áreas naturais em urbanas ou agropecuárias” corresponde a substituição de classes naturais por áreas urbanas ou agropecuárias. Essa mudança ocorreu em 13,17% do território nacional, com mais de 1 milhão e 150 mil quilômetros quadrados, tornando o crescimento da infraestrutura urbana e a expansão agropecuária os principais promotores das mudanças do uso e cobertura da terra nos Biomas brasileiros. Tais atividades podem gerar impactos negativos no meio ambiente quando realizadas sem o devido planejamento ambiental.

Figura 6 – Modelo Estatístico da Segunda Componente Principal Reclássificada.



Elaboração: Os Autores (2021).

A Figura 6 apresenta a distribuição dessa mudança na cor lilás. Pode-se destacar o arco do desmatamento nos estados de Rondônia (Zoom A na Figura 6), Mato Grosso, Pará, Maranhão e Tocantins onde houve uma alta taxa de desmatamento devido ao avanço da fronteira agrícola em direção a Amazônia (MATOS, 2016), com conversão das classes de Formação Florestal, Savânica e Campestre em áreas de Pastagem e de Cultura anual e perene. As mudanças em Goiás, Mato Grosso, no Oeste de São Paulo, Paraná e Santa Catarina estão relacionadas com o avanço da fronteira agrícola sobre o Centro-Oeste brasileiro. Na região do MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) é possível também visualizar a ocupação da agropecuária sobre as áreas naturais (VIEIRA, 2016). O crescimento urbano ocorreu de forma mais significativa nos municípios da zona costeira, onde se concentra a maior porcentagem da população brasileira (LIMA, 2016). Diversos autores também identificaram o avanço da agropecuária nos biomas brasileiros como IBGE (2020), Souza et al. (2020), Beuchle et al. (2015), Oliveira et al. (2017), Matricardi et al. (2019) e

Miranda, Paranho-Filho e Pott (2018).

A mudança “Barragens ou áreas alagadas” está associada a construção de barragem, e um consequente alargamento do leito do rio ou a criação de lagos artificiais, ou áreas em que houve acúmulo de água por processos naturais. Essa mudança correspondeu a 0,12% do território nacional, com mais de 10 mil quilômetros quadrados. A Figura 6 apresenta a distribuição dessa mudança na cor azul claro, onde é possível visualizar a ocorrência nos estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso e nos entornos do Rio Amazonas. Destacando-se a implementação das barragens da Usina da Serra da Mesa (Goiás) no Zoom C na Figura 6 e a Porto Primavera (Rio Paraná).

### 3.3 Análise das relações espaço-temporais entre os usos e coberturas da terra identificados e as Componentes Principais

A seguir são apresentados os resultados da quantificação do coeficiente de correlação entre as CP e os dados de entrada do MapBiomass, e a análise temporal com a identificação dos anos que mais se distanciam ou aproximam do modelo estatístico da segunda Componente Principal. O que permite analisar as relações espaço-temporais entre os usos e coberturas da terra identificados com a ACP. A Figura 7 apresenta os gráficos de correlação para cada CP.

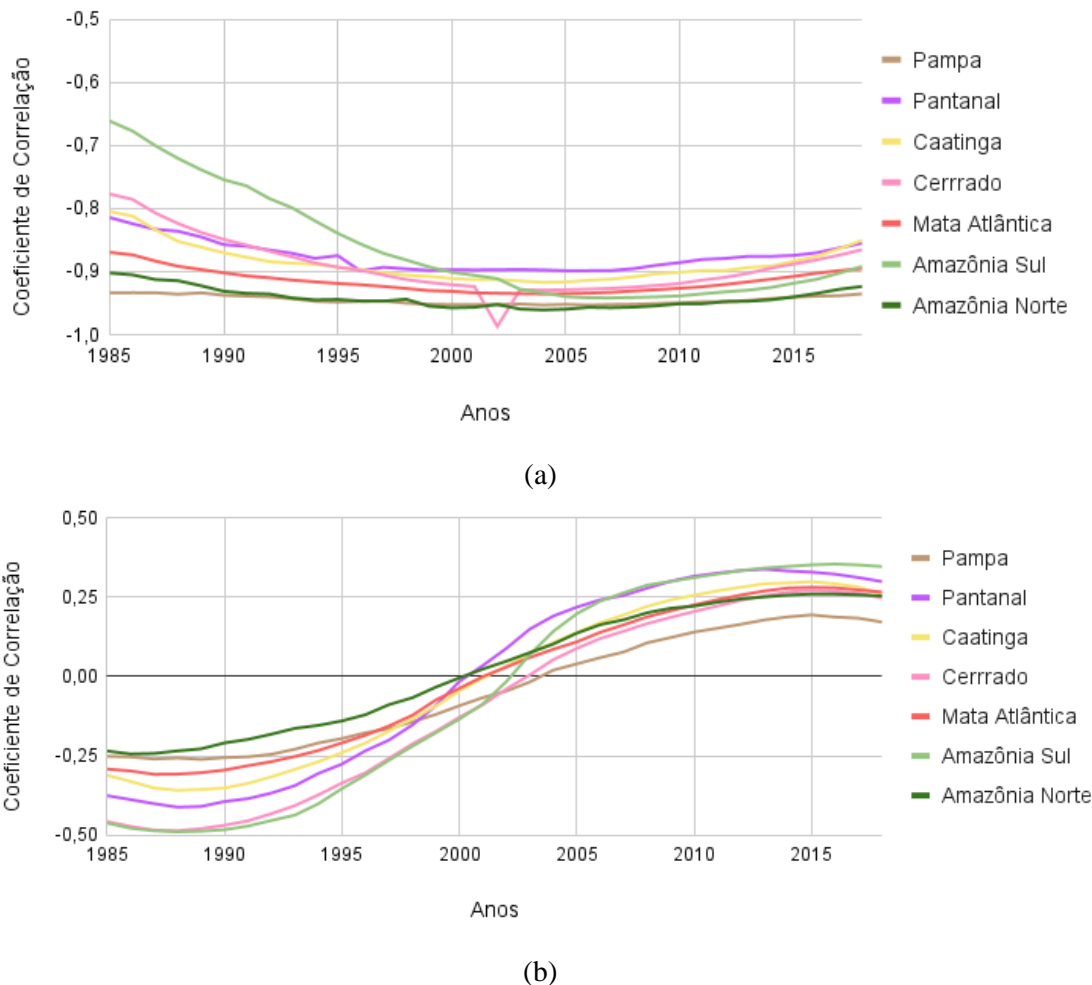
A correlação referente a primeira Componente Principal está apresentada no gráfico da Figura 7a. Observa-se um padrão entre os coeficientes de correlação, todos possuem valores negativos, variando de -0,6 até -0,98. Esse comportamento dos coeficientes indica uma associação da primeira Componente Principal com o padrão de uso e cobertura da terra — com a estrutura de distribuição espaço-temporal.

Para o Pampa, Amazônia Norte e Mata Atlântica o gráfico (Figura 7a) apresenta praticamente uma linha reta, indicando uma maior correlação negativa e estabilização das classes de uso e cobertura da terra entre 1985 e 2018. Na Caatinga, Cerrado e Pantanal os valores de correlação são maiores no início da série temporal e reduzem a partir de 1995. Por fim, a Amazônia Sul apresenta valores maiores na década de 1980 e 1990, que reduzem a partir dos anos 2000. Essa correlação mais fraca nos anos iniciais está relacionada com as mudanças no uso e cobertura da terra que ocorreram nestas regiões neste período, e que se distanciam do padrão de distribuição das classes.

Na Figura 7b temos o coeficiente de correlação entre a segunda Componente Principal e os mapas do MapBiomass para todas as regiões de análise. É possível visualizar um mesmo padrão, uma curva em forma de “S”, partindo de valores negativos e chegando a valores positivos. A amplitude do coeficiente de correlação foi de -0,48 até 0,35. Essa curva de distribuição dos valores dos coeficientes de correlação indica uma aproximação (valores positivos) e um distanciamento (valores negativos) com o modelo estatístico da segunda Componente Principal. A análise do gráfico permite indicar os anos das condições iniciais (antes das mudanças, valores negativos) e as condições finais (depois das mudanças, valores positivos), e analisar o comportamento temporal das mudanças no uso e cobertura da terra.

A partir da análise do gráfico (Figura 7b) verifica-se que o Pampa, Amazônia Norte, Caatinga e Mata Atlântica apresentaram curvas mais suaves, o que indica mudanças mais brandas no uso e cobertura da terra, sem transformações rápidas. Desta forma, não possuem uma grande amplitude entre os valores de correlação entre as condições iniciais e finais. Entretanto, encontra-se uma situação diferente na Amazônia Sul, no Cerrado e no Pantanal. A curva gerada pelos valores de correlação é mais acentuada e há uma maior amplitude entre a correlação das condições iniciais e finais. Essa característica aponta que nestas regiões ocorreram mudanças mais rápidas e intensas no uso e cobertura da terra durante o período analisado. No Pantanal a curva se torna mais íngreme entre os anos de 1995 e 2005, o que indica uma taxa rápida de mudança no uso e cobertura da terra. No Bioma Cerrado ocorre uma rápida mudança no uso e cobertura da terra entre 1990 e 2005 (curva íngreme), com uma estabilização posterior.

Figura 7 – Gráficos dos coeficientes de correlação. (a) Coeficiente de Correlação entre a Primeira Componente Principal e os mapas de uso e cobertura da terra do MapBiomias; (b) Coeficiente de Correlação entre a Segunda Componente Principal e os mapas de uso e cobertura da terra do MapBiomias.



Elaboração: Os autores (2021).

A região da Amazônia Sul apresentou uma rápida velocidade de mudança no uso e cobertura da terra entre 1990 e 2000. Sendo que no período entre 2000 e 2005 a taxa de mudança se intensificou gerando um crescimento visível nos valores de correlação. Souza et al. (2020) identificou que entre o período de 1985 e 2005 ocorreram altas taxas de mudanças anuais no Brasil, com perda de áreas florestais e expansão de áreas de água e agropecuária, tal informação corrobora com os resultados aqui encontrados por meio do coeficiente de correlação.

Para identificar as relações espaço-temporais das mudanças no uso e cobertura da terra nos Biomas brasileiros foram selecionados os mapas do MapBiomias dos anos que apresentaram os maiores (semelhança) e menores (divergências) coeficientes de correlação com o modelo estatístico da segunda Componente Principal. Os anos selecionados e seus respectivos coeficientes de correlação estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Anos de maior e menor correlação com a Segunda Componente Principal.

Região de Análise	Menor Coeficiente de Correlação	Ano	Maior Coeficiente de Correlação	Ano
Pampa	-0,2613	1989	0,1946	2015
Pantanal	-0,4121	1988	0,3387	2013
Caatinga	-0,3563	1989	0,2991	2015
Cerrado	-0,4866	1988	0,2718	2015
Mata Atlântica	-0,3085	1987	0,2814	2015
Amazônia Sul	-0,4899	1988	0,355	2016
Amazônia Norte	-0,2443	1986	0,2603	2015

Elaboração: Os autores (2021).

Os menores coeficientes de correlação ocorreram nos anos iniciais da série temporal (Tabela 4), entre 1986 e 1989. Tais valores, os menores, indicam uma divergência em relação ao modelo estatístico da segunda Componente Principal, ou seja, correspondem ao período anterior as mudanças no uso e cobertura da terra e não se assemelham ao padrão espacial representado por esta Componente Principal. Apontando para uma condição inicial do uso e cobertura da terra brasileira, no qual as mudanças ainda não haviam ocorrido. Os mapas de uso e cobertura da terra do MapBiomias para os anos identificados para cada região de análise com os menores valores de correlação foram unidos em um único mosaico, apresentado na Figura 8a.

Os maiores valores do coeficiente de correlação ocorreram nos anos finais da série temporal observada, se concentrando entre 2013 e 2016 (Tabela 4). Esses valores maiores indicam uma semelhança entre os dados e o modelo estatístico da segunda Componente Principal. Assim, os anos que apresentaram os maiores valores de correlação estão relacionados com a condição final do uso e cobertura da terra brasileira, quando as mudanças já ocorreram. Os mapas de uso e cobertura da terra do MapBiomias para os anos identificados para cada região de análise (Tabela 4) com os maiores valores de correlação foram unidos em um único mosaico, apresentado na Figura 8.

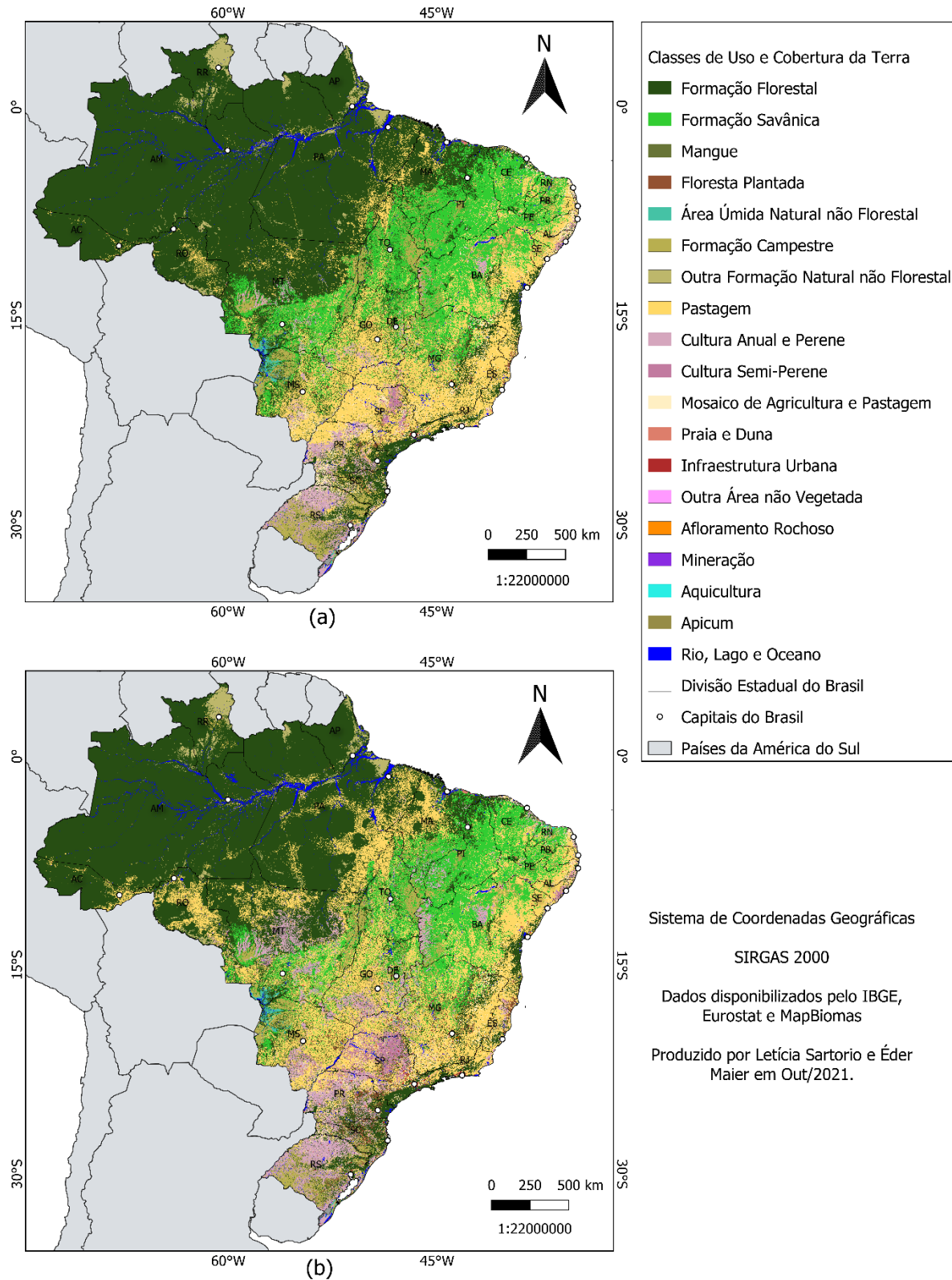
Ao visualizar a Figura 8 podemos encontrar diversas mudanças no uso e cobertura da terra nos Biomas brasileiros. Primeiramente, destaca-se o avanço da fronteira agrícola em direção a Amazônia, com forte presença na região do arco do desmatamento, e com grande destaque para a expansão das áreas de pastagem. Também é possível perceber grandes mudanças nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, com um crescimento das áreas de pastagens e de culturas anual e perene, e de semi-perene. Como apresentado, a mudança “Conversão de áreas naturais em agropecuárias e urbanas” foi responsável por 13,17% das mudanças no uso e cobertura da terra e se visualiza esse processo através da Figura 6. Além disso, a região da Amazônia Sul e do Cerrado apresentaram uma taxa rápida de mudanças (Figura 7b), o que gera significativos impactos ambientais.

Nos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul se visualiza um movimento de expansão das classes de agricultura de Leste em direção a Oeste, ocupando áreas que antes pertenciam a pastagem, esse processo também foi encontrado no estudo do IBGE (2020). Na Caatinga há um crescimento da pastagem em direção ao interior do continente. E na região do MATOPIBA, que é uma nova fronteira agrícola no Brasil, pode-se visualizar a ocupação da pastagem e de áreas de cultivo em locais que antes continham classes de formações vegetais. Essas mudanças também foram evidenciadas pelo IBGE (2020).

A comparação entre os dois mapas da Figura 8 nos aponta as direções espaciais das mudanças no uso e cobertura da terra brasileira. Com destaque para a expansão da agropecuária em direção ao interior do continente, consolidando a fronteira agrícola e o Centro-Oeste como um grande produtor agropecuário (EMBRAPA, 2018). Além disso, visualizamos o avanço da fronteira agrícola em direção a Amazônia e a grande alteração nesta área, e que em muitas vezes o avanço da agropecuária ocorre por meio do desmatamento ilegal (GUIMARÃES, 2016). Na região do MATOPIBA, fronteira agrícola recente, percebemos também o crescimento da agropecuária que está se estabelecendo e expandido. Mas de forma geral, a nível de Brasil, ocorreu um movimento de interiorização das classes agropecuárias que ocuparam os locais mais remotos, com o avanço da pastagem e da agricultura, sendo que se verificou casos em que a agricultura ocupa áreas de antigas pastagens (IBGE, 2020).

Esse movimento de interiorização da agropecuária foi acompanhado por migrações populacionais no território nacional, elas intensificaram-se a partir da década de 1980 e resultaram em mudanças significativas no espaço agrário brasileiro. O avanço da fronteira agrícola sobre o Centro-Oeste se dá pela migração de sulistas para esta área durante a década de 1980, e nos anos 1990 esses produtores se direcionam para o Norte e MATOPIBA. Os movimentos migratórios em direção ao meio urbano concentraram a população em áreas urbanas já consolidadas, principalmente no litoral e no Sudeste, nos quais houve significativo crescimento da área urbana (LIMA, 2016). Também se constata a preservação de áreas de formações vegetais na Amazônia, no litoral da Mata Atlântica, e no interior da Caatinga com divisa com o Cerrado. Porém, a expressiva transformação do território brasileiro em relação ao uso e cobertura da terra gera diversos impactos no sistema ambiental.

Figura 8 – (a) Mapa de uso e cobertura da terra com os anos de menor correlação com a Segunda Componente Principal; (b) Mapa de uso e cobertura da terra com os anos de maior correlação com a Segunda Componente Principal.



Elaboração: Os autores (2021).



## 4 CONCLUSÕES

A técnica estatística de ACP se mostrou eficaz para sintetizar o banco de dados do MapBiomias e indicar as mudanças espaciais dos Biomas brasileiros entre os anos de 1985 e 2018. Possibilitando a caracterização dos padrões de uso e cobertura da terra temporalmente. Além disso, destaca-se a importância do monitoramento realizado pelo Projeto MapBiomias e das ferramentas de computação disponibilizadas no GEE. Tendo em vista que possibilitaram implementar a ACP para identificar padrões e mudanças espaço-temporais dos usos e cobertura da terra nos Biomas brasileiros.

Se evidencia o potencial do uso do GEE para o processamento e análise de *big data* e da técnica estatística de ACP. Esta permitiu a redução do conjunto de dados original de 34 imagens para duas CP que explicam mais de 84% da variância do banco de dados. O GEE representa um avanço no campo do processamento e gerenciamento de grandes conjuntos de dados espaço-temporais. Entretanto, a plataforma também apresenta seus limites em termos de capacidade de processamento, que resultaram na divisão do dado do MapBiomias por região de análise. Por outro lado, a divisão do dado permitiu a sua comparação e a avaliação dos distintos ritmos das mudanças espaço-temporais.

Os resultados mostraram que o espaço geográfico brasileiro passou por significativas mudanças ao decorrer de 34 anos, sendo que os principais vetores que impulsionaram essas transformações foram as atividades antrópicas, como o crescimento urbano, o avanço da agropecuária no interior do país e a implementação de barragens. Sabe-se que tais atividades podem causar diversos impactos no sistema ambiental que refletem na qualidade de vida da população, tornando necessário medidas mitigadoras e compensatórias dos impactos ambientais. Ao mesmo tempo, foi observado processos de “regeneração” da vegetação e processos naturais de mudança no uso e cobertura da terra.

A Amazônia Sul e o Cerrado apresentaram as mudanças espaciais mais significativas e os processos mais rápidos (ao longo do tempo), o que está relacionado com o avanço da fronteira agrícola na região e a consequente perda de cobertura vegetal natural. O Pampa, Amazônia Norte e Mata Atlântica apresentaram mudanças mais brandas no uso e cobertura da terra, com menor velocidade. O Pantanal teve uma taxa de mudança elevada, com perda de superfície de água e avanço da pastagem sobre as formações naturais. A Caatinga apresentou uma taxa de mudança intermediária causada pelo avanço da agropecuária, que se expande pelo uso da irrigação em áreas de cultivo (EMBRAPA, 2018). Em todos os Biomas encontrou-se o avanço de classes agropecuárias, motivadas pela interiorização dessa atividade no Brasil, e o crescimento de áreas urbanas, devido a migração populacional que segue as atividades econômicas. De maneira geral, o território brasileiro teve suas principais mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 1990 e 2005. Com a primeira Componente Principal se identificou os principais padrões espaciais de uso e cobertura da terra entre 1985 e 2018, abrangendo áreas nativas e a natureza transformada,

Por fim, conclui-se que a união entre uma plataforma de processamento em nuvem, como GEE, e de técnicas estatísticas, como a ACP, apontam para um caminho para o gerenciamento e a extração de informações importantes de grandes séries temporais. Assim, auxiliando no monitoramento ambiental em pequena escala pela identificação e compreensão dos padrões e das mudanças espaço-temporais no uso e cobertura da terra nos Biomas brasileiros.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de iniciação científica (número do processo: 126327/2020-3).

### Contribuição dos Autores

Os autores Letícia Sartorio e Éder Maier definiram em conjunto a conceptualização e a metodologia empregadas. A primeira autora foi responsável pela curadoria dos dados, análise formal, investigação, validação, visualização e redação-revisão e edição. O segundo autor foi responsável pela aquisição de financiamento, administração e supervisão do projeto.

## Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há nenhum conflito de interesse.

## Referências

- AMANI, M.; GHORBANIAN, A.; AHMADI, S. A.; KAKOOEI, M.; MOGHIMI, A.; MIRMAZLOUMI, S. M.; BRISCO, B. Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 5326-5350, 2020. DOI. 10.1109/JSTARS.2020.3021052.
- ANTUNES, R. L.S. **Variação espaço-temporal de NDVI em área de aproveitamento hidroelétrico-UHE Santo Antônio, Porto Velho (RO)**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; & ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116-127, 2015. DOI. 10.1016/j.apgeog.2015.01.017 0143-6228.
- BORGES, G. M.; PACHÊCO, A. P.; DOS SANTOS, F. KS. Sensoriamento Remoto: Avanços e Perspectivas. **Revista de Geografia (UFPE) V**, v. 32, n. 2, p. 267-292, 2015.
- BRASIL. **PPCerrado: Plano de Ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no Cerrado: 2ª fase (2014-2015)**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 26-39, 2014.
- DENG, J. S.; WANG, K.; DENG, Y. H.; QI, G. J. PCA-based land-use change detection and analysis using multitemporal and multisensor satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 16, p. 4823-4838, 2008. DOI. 10.1080/01431160801950162
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília: Embrapa, 2018.
- GUIMARÃES, L. S. P. Evolução do espaço rural brasileiro. In: DE FIGUEIREDO, A. H. (Ed.). **Brasil: uma visão geográfica e ambiental no início do século XXI**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016, p. 119-137.
- GUPTA, R. P.; TIWARI, R. K.; SAINI, V.; SRIVASTAVA, N. A simplified approach for interpreting principal component images. **Advances in Remote Sensing**, v. 2, p. 111-119, 2013. DOI: 10.4236/ars.2013.22015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contas de ecossistemas: o uso da terra nos Biomas brasileiros: 2000- 2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.
- LI, J.; PEY, Y.; ZHAO, S.; XIAO, R.; SANG, X.; ZHANG, C. A review of remote sensing for environmental monitoring in China. **Remote Sensing**, v. 12, n. 7, p. 1130, 2020. DOI. 10.3390/rs12071130.
- LIMA, M. H. P. A delimitação legal dos espaços urbanos. In: DE FIGUEIREDO, A. H. (Ed.). **Brasil: uma visão geográfica e ambiental no início do século XXI**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016, p. 75-100.
- MALDONADO, F. D. **Análise por Componentes Principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semi-árido brasileiro: Quixaba/PE**. 132f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- MANLY, B. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. 3ª edição. Porto Alegre: Bookman Editora, 2008.
- MAPBIOMAS. **Coleção [4.0] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 10 Out. 2020.
- MATHER, P.; TSO, B. **Classification methods for remotely sensed data**. 2ª edição. Boca Raton: CRC Press, 2009.

- MATOS, F. L. L. C.C. **Análise das taxas anuais de desmatamento na Amazônia Legal a partir da relação entre autos de infração e área desmatada no período entre 2000 e 2014**. 90f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- MATRICARDI, E. A. T.; MENDES, T. J.; PEREIRA, E. M.; VASCONCELOS, P. G. A.; ÂNGELO, H.; COSTA, O. B. Dinâmica no uso e cobertura da terra na região do MATOPIBA entre 2000 e 2016. **Nativa**, v. 7, n. 5, p. 547-555, 2019. DOI. 10.31413/nativa.v7i5.7391.
- MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- MIRANDA, C. S.; PARANHO FILHO, A. C.; POTT, A. Changes in vegetation cover of the Pantanal wetland detected by Vegetation Index: a strategy for conservation. **Biota Neotropica**, v. 18, n. 1, p. 1-6, 2018. DOI. 10.1590/1676-0611-BN-2016-0297.
- NASCIMENTO, D.; RIBEIRO, S. **Biomás Brasileiros e Defesa da Vida**. Goiânia: Editora Kleys, 2017.
- NEISSE, A. C.; HONGYU, K. Aplicação de componentes principais e análise fatorial a dados criminais de 26 estados dos EUA. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 2, p. 105-115, 2016. DOI. 10.18607/ES201654354.
- OLIVEIRA, T. E.; DE FREITAS, D. S.; GIANEZINI, M.; RUVIARO, C. F.; ZAGO, D.; MÉRCIO, T. Z.; BARCELLOS, J. O. J. Agricultural land use change in the Brazilian Pampa Biome: The reduction of natural grasslands. **Land use policy**, v. 63, p. 394-400, 2017. DOI. 10.1016/j.landusepol.2017.02.010.
- REIS, E. **Estatística multivariada aplicada**. 2º edição. Lisboa: Edições Sílabo, 2001.
- SANTOS, K. S. M.; LINGNAU, C. Desmatamento no entorno da Rodovia Transamazônica no Estado do Pará e a importância de Áreas Protegidas. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18º, 2017, Santos. **Anais eletrônicos**. Campinas: GALOÁ, 2020. p. 4534-4541.
- SOUZA, C.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; ...; AZEVEDO, T. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 27, 2020. DOI:10.3390/rs12172735.
- SOUZA-FILHO, P. W. M.; DE SOUZA, E. B.; JÚNIOR, R. O. S.; NASCIMENTO JR, W. R.; DE MENDONÇA, B. R. V.; GUIMARÃES, J. T. F.; SIQUEIRA, J. O. Four decades of landcover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **Journal of environmental management**, v. 167, p.175-184.
- TAMIMINIA, H.; SALEHI, B.; MAHDIANPARI, M.; QUACKENBUSH, L.; ADELI, S.; BRISCO, B. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 164, p. 152-170, 2020. DOI. 10.1016/j.jenvman.2015.11.039.
- TAYLOR, R. Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. **Journal of diagnostic medical sonography**, v. 6, n. 1, p. 35-39, 1990. DOI. 10.1177/875647939000600106.
- VIEIRA FILHO, J. E. R. Expansão da fronteira agrícola no Brasil: desafios e perspectivas. **Texto para discussão - IPEA**. Rio de Janeiro: IPEA, 2016.
- ZANOTTA, D.; FERREIRA, M.; ZORTEA, M. **Processamento de Imagens de Satélite**. 1º edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

## Biografia do autor principal



Letícia Figueiredo Sartorio, nascida em Rio Grande no ano de 1998. Possui técnico em Geoprocessamento pelo Instituto Federal do Rio Grande do Sul – IFRS (2016) e graduação em Geografia Bacharelado pela Universidade Federal do Rio Grande (2022). Atualmente é mestranda no Programa de Pós-Graduação em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na linha de Análise Ambiental.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.